

明 細 書

2 足歩行移動体の関節モーメント推定方法

技術分野

本発明は、人間や2足歩行ロボット等の2足歩行移動体の各脚体の関節に作用するモーメント（関節モーメント）を推定する方法に関する。

背景技術

例えば人間の歩行動作を補助する歩行アシスト装置の動作制御を行なう場合、人間の脚体の関節に実際に作用する関節モーメントを把握することが必要となる。この関節モーメントを把握することで、歩行アシスト装置の目標補助力を適正に決定することが可能となる。また、2足歩行ロボットにおいても、その動作制御を行なうために、脚体の各関節に実際に作用する関節モーメントを適宜把握する必要がある場合がある。

そこで、本願出願人は先に、例えば特開2003-89083号公報（以下、特許文献1という）等にて人間等の2足歩行移動体の脚体の関節モーメントを推定する手法を提案した。この手法では、2足歩行移動体の脚体の各関節の変位量（回転角）や、所定部位の加速度、角速度が所要のセンサを用いて計測され、それらの計測データや2足歩行移動体の剛体リンクモデル等を用いて各脚体に作用する床反力ベクトルとその作用点の位置とが推定される。ここで、剛体リンクモデルは、2足歩行移動体の構造を、複数の剛体要素を複数の関節要素で連結してなる連結体として表現するモデルである。この剛体リンクモデルは、2足歩行移動体の全体重心の位置や、各剛体要素および各関節要素にそれぞれ対応する2足歩行移動体の剛体相当部（大腿部、下腿部、腰部等）および関

節（膝関節、股関節等）の位置、姿勢を推定するために用いられる他、
2足歩行移動体の動力学的な挙動を記述するモデルの基礎として用いられる。なお、剛体リンクモデルの各剛体要素には、その重量や長さ、重心の位置（各剛体要素上での位置）が付随的にあらかじめ設定される。

5 そして、前記特許文献1のものでは、推定した床反力ベクトルとその作用点の位置と剛体リンクモデルとを用いて、逆動力学モデルに基づく演算処理によって各脚体の膝関節や股関節の関節モーメントが推定される。逆動力学モデルは、それを一般的に言えば、物体に作用する外力と位置情報とを既知として（該外力および位置情報を入力パラメータとして）、
10 該物体の内力である反力やモーメントを推定するための動力学モデルであり、物体の運動（位置の時系列パターン）と該物体に作用する力やモーメントとの関係を表すものである。前記特許文献1の手法では、逆動力学モデルは、前記剛体リンクモデルの各剛体要素の運動（並進運動および回転運動）に関する運動方程式を基に構築され、各脚体の関節
15 モーメントが、床反力ベクトルの作用点により近い関節側のものから順番に推定される。

ところで、前記特許文献1のもののように関節モーメントを推定する場合、床反力ベクトルやその作用点、並びに逆動力学モデルは、ある1つの座標系で記述する必要がある。そして、特許文献1のものでは、
20 その座標系として床に固定した絶対座標系が用いられていた。

このように絶対座標系を用いた場合には、2足歩行移動体のある所定部位（詳しくは剛体リンクモデルのある剛体要素に対応する剛体相当部）の絶対座標系での傾斜角、例えば鉛直方向に対する傾斜角を把握しつつ、2足歩行移動体のある基準部位に対する相対的な位置・姿勢として把握される2足歩行移動体の各部位（剛体リンクモデルの各剛体要素
25 に対応する剛体相当部）の位置・姿勢を絶対座標系での値に変換しなけ

ればならない。また、床反力ベクトルや関節モーメントを求める場合、剛体リンクモデルの各胴体要素の重心の絶対座標系での位置も推定する必要があるので、それらの重心の位置を絶対座標系で表すための演算処理（座標変換処理）も必要となる。従って、上記傾斜角を用いた座標変換等の演算処理が多数、必要となる。

この場合、2足歩行移動体のある所定部位の鉛直方向に対する傾斜角の計測手法としては、角速度を検出するジャイロセンサの検出値を積分する手法、該ジャイロセンサと加速度センサとを併用して所謂カルマンフィルタの手法で傾斜角を推定する手法、あるいは、振子式の傾斜計で傾斜角を直接検出する手法等が一般的に知られている。しかるにこれらのいずれの手法でも、ジャイロセンサの検出値の積分に伴う誤差の蓄積や2足歩行移動体の運動時の慣性加速度などの影響で、一般には鉛直方向に対する傾斜角を十分に満足できる精度で計測することはできない場合が多い。従って、2足歩行移動体のある所定の部位の絶対座標系における傾斜角を高精度で把握することは一般には困難である。このため、上記のようにその傾斜角を用いた座標変換等の演算処理を多数、必要となる特許文献1の手法では、演算誤差が蓄積し易く、それが関節モーメントの推定精度を向上させる妨げとなっていた。

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、２足歩行移動体の重力方向に対する傾斜情報を使用する演算処理を可能な限り少なくして、脚体の関節モーメントの推定精度を高めることができる２足歩行移動体の関節モーメント推定方法を提供することを目的とする。

発明の開示

本発明の２足歩行移動体の関節モーメント推定方法は、２足歩行移動体を、複数の剛体要素が少なくとも該２足歩行移動体の各脚体の股関節

- 及び膝関節に対応する関節要素を含む複数の関節要素で連結された連結体として表現する剛体リンクモデルを用い、該2足歩行移動体の各脚体の少なくとも1つの関節に作用する関節モーメントを推定する方法であって、前記剛体リンクモデルの各関節要素に対応する前記2足歩行移動
- 5 体の各関節の変位量を逐次把握する第1ステップと、前記剛体リンクモデルの所定の1つの剛体要素に固定された座標系としてあらかじめ設定された身体座標系の原点の加速度ベクトルの該身体座標系での値を少なくとも前記2足歩行移動体に装着した加速度センサの出力を用いて逐次把握する第2ステップと、前記2足歩行移動体の各脚体に作用する床反
- 10 カベクトルの前記身体座標系での値を逐次把握する第3ステップと、前記床反力ベクトルの作用点の位置ベクトルの前記身体座標系での値を逐次把握する第4ステップと、前記第1乃至第4ステップで把握した2足歩行移動体の各関節の変位量と前記身体座標系の原点の加速度ベクトルの値と前記床反力ベクトルの値とその作用点の位置ベクトルの値とを用
- 15 いて、前記剛体リンクモデルの各剛体要素の運動と該剛体要素に作用する並進力およびモーメントとの関係を前記身体座標系を用いて表す逆動力学モデルに基づいて前記2足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用する関節モーメントを逐次推定する第5ステップとを備えたことを特徴とするものである（第1発明）。
- 20 かかる本発明によれば、前記剛体リンクモデルの各関節要素に対応する2足歩行移動体の各関節の変位量（関節の回転角等）を逐次把握すると共に、剛体リンクモデルの所定の剛体要素に固定された身体座標系の原点の加速度ベクトルの身体座標系での値と、床反力ベクトルおよびその作用点の位置ベクトルの身体座標系での値とを逐次把握することで、
- 25 主に身体座標系で記述されるアルゴリズムによって関節モーメントを推定することが可能となる。すなわち、前記第1ステップで把握した各関

節の変位量（これは剛体リンクモデルの各関節要素の変位量に相当する）によって、前記剛体リンクモデルの各剛体要素に対応する2足歩行移動体の各剛体相当部の相対的な位置関係および姿勢関係を逐次把握することができるので、身体座標系の原点から見た2足歩行移動体の各剛体相当部の位置および姿勢（向き）（剛体リンクモデルの各剛体要素の位置及び姿勢）を逐次把握できる。従って、各剛体要素あるいはそれに対応する2足歩行移動体の各剛体相当部の、身体座標系の原点から見た運動状態（位置、速度、加速度などの状態）を逐次把握できる。さらに、前記第2ステップで加速度センサの出力を用いて把握した身体座標系の原点の加速度ベクトルの身体座標系での値（詳しくは加速度ベクトルの、身体座標系での座標成分値の組）を用いることによって、身体座標系を固定した前記所定の剛体要素に対応する2足歩行移動体の剛体相当部の運動（地面に対する運動）とその剛体相当部に対する2足歩行移動体の各部の相対的な運動とを合わせた全体的な運動に伴う剛体リンクモデルの各剛体要素の加速度等の運動状態を身体座標系での値によって逐次把握できることとなる。なお、前記身体座標系の原点の加速度ベクトルには、重力に伴う慣性加速度成分が含まれる。そして、このように剛体リンクモデルの各剛体要素の加速度等の運動状態を身体座標系での値によって逐次把握できるので、前記第3ステップおよび第4ステップで床反力ベクトルおよびその作用点の位置ベクトルの身体座標系での値（詳しくは、床反力ベクトルのおよびその作用点の位置ベクトルのそれぞれの、身体座標系での座標成分値の組）とを把握することで、前記逆動力学モデルを身体座標系で表現することが可能となる。その結果、身体座標系での床反力ベクトルの値、その作用点の位置ベクトルの値、各剛体要素の位置、加速度等の運動状態の値を用いた逆動力学モデルの演算処理によって脚体の関節に作用する関節モーメントを推定することが可能とな

る。

このように本発明によれば、身体座標系での各剛体要素あるいはこれ
に対応する2足歩行移動体の各剛体相当部の運動状態の値を用いて脚体
の関節モーメントを推定できるので、2足歩行移動体の傾斜情報（2足
5 歩行移動体のある部位が鉛直方向あるいは水平方向に対してどれだけ傾
いているか等の情報）を使用する演算処理を少なくできる。その結果、
脚体の関節モーメントの推定精度を高めることができる。

なお、床反力ベクトルの身体座標系での値は、後述する手法により2
足歩行移動体の傾斜情報を使用せずに把握することが可能である。ある
10 いは、2足歩行移動体の脚体の底部等に荷重センサ（力センサ）を装着
し、その出力を用いて床反力ベクトルの身体座標系での値を把握するこ
とも可能である。また、床反力ベクトルの作用点の身体座標系での位置
ベクトルの値は、後述するように2足歩行移動体の傾斜情報を使用して
把握することも可能であるが、例えば2足歩行移動体の脚体の底部（足
15 底）に圧力分布センサを備えた場合には、2足歩行移動体の傾斜情報
を使用せずに把握することが可能である。

かかる本発明では、前記加速度センサは、基本的には2足歩行移動体
のどの剛体相当部に装着されていてもよいが、前記身体座標系が固定さ
れた剛体要素に対応する2足歩行移動体の剛体相当部に装着されている
20 ことが好ましい（第2発明）。すなわち、身体座標系が固定された剛体
要素に対応する2足歩行移動体の剛体相当部以外の部位に加速度センサ
が装着されている場合には、その装着部位の加速度ベクトルから、2足
歩行移動体の関節の変位量等を用いて身体座標系が固定された剛体要素
に対応する剛体相当部の加速度ベクトルを算出する必要がある。これに
25 対して、第2発明の如く、身体座標系が固定された剛体要素に対応する
剛体相当部に加速度センサが装着されている場合には、該身体座標系の

原点と加速度センサとの位置関係が固定されているので、2足歩行移動体の関節の変位量を使用することなく身体座標系の原点の加速度ベクトルの身体座標系での値を加速度センサの出力から把握することができる。その結果、把握する身体座標系の原点の加速度ベクトルの身体座標系での値の精度を高めることができる。

さらに、上記第2発明では、前記身体座標系が固定された剛体要素は、前記2足歩行移動体の一对の股関節に対応する一对の関節要素を連結する剛体要素であることが好ましい（第3発明）。すなわち、2足歩行移動体の一对の股関節に対応する一对の関節要素を連結する剛体要素は2足歩行移動体の腰部に対応するものであり、該腰部は、一般に2足歩行移動体の移動時の動きが比較的小さい。このため、加速度センサの出力の急変を少なくして、該加速度センサの出力を比較的安定させることができ、ひいては、把握する身体座標系の原点の加速度ベクトルの身体座標系での値の精度を高めることができる。

前記第1～第3発明において、前記第3ステップで床反力ベクトルの身体座標系での値を把握することは、前記したように荷重センサを用いて行うことも可能である。但し、特に2足歩行移動体が人間である場合には脚体に荷重センサを装着すると、円滑な歩行の妨げになりやすい。そこで、第4発明では、例えば次のような手法により床反力ベクトルの身体座標系での値を把握する。

すなわち、前記2足歩行移動体の全体重心の位置ベクトルの前記身体座標系での値を前記第1ステップで把握した2足歩行移動体の各関節の変位量と前記剛体リンクモデルとを用いて逐次求める第6ステップと、その全体重心の位置ベクトルの値の時系列データおよび前記第2ステップで把握した身体座標系の原点の加速度ベクトルの値から該全体重心の加速度ベクトルの身体座標系での値を逐次把握する第7ステップと、前

記2足歩行移動体の運動状態が一对の脚体のうちの一方の脚体のみが接地している単脚支持状態であるか、両脚体が接地している両脚支持状態であるかを逐次判断する第8ステップとを備える。そして、前記第3ステップは、2足歩行移動体の運動状態が前記単脚支持状態であるときに

5 は、前記第7ステップで求めた前記全体重心の加速度ベクトルの値と2足歩行移動体の全体重量と接地している脚体に作用する床反力ベクトルとにより表される該2足歩行移動体の全体重心の運動方程式に基づいて該床反力ベクトルの身体座標系での値を推定する。また、2足歩行移動体の運動状態が前記両脚支持状態であるときには、前記第7ステップで

10 求めた前記全体重心の加速度ベクトルの値と2足歩行移動体の全体重量と両脚体のそれぞれに作用する床反力ベクトルとにより表される該2足歩行移動体の全体重心の運動方程式と、各脚体に作用する床反力ベクトルが該脚体の下端部近傍にあらかじめ定めた特定部から2足歩行移動体の全体重心に向かって作用するベクトルであると仮定して定まる、2足

15 歩行移動体の全体重心に対する該脚体の特定部の相対位置と該脚体に作用する床反力ベクトルとの間の関係式とに基づいて両脚体のそれぞれに作用する床反力ベクトルの身体座標系での値を把握する（第4発明）。

これによれば、単脚支持状態と両脚支持状態とで2足歩行移動体の全体重心の運動方程式（全体重心の並進運動に関する運動方程式）を基本

20 として、接地している脚体に作用する床反力ベクトルを推定するので、2足歩行移動体の歩行の妨げあるいは負担となるような荷重センサを使用することなく、床反力ベクトルを推定できる。なお、両脚支持状態では、全体重心の運動方程式だけでは各脚体のそれぞれに作用する床反力ベクトルを特定できないが、各脚体に作用する床反力ベクトルが該脚体

25 の下端部近傍にあらかじめ定めた特定部（例えば各脚体の足首関節、床反力作用点等）から2足歩行移動体の全体重心に向かって作用するベク

トルであると仮定して定まる、2足歩行移動体の全体重心に対する該脚
体の特定部の相対位置と該脚体に作用する床反力ベクトルとの間の関係
式をさらに用いることによって、各脚体毎の床反力ベクトルを推定でき
る。この場合、前記運動方程式で必要となる2足歩行移動体の全体重心
5 の加速度ベクトルは、その身体座標系での値が前記第7ステップで逐次
求められるので、その全体重心の運動方程式を身体座標系の座標成分値
だけで記述することができる。また、前記2足歩行移動体の全体重心に
対する脚体の特定部の相対位置と該脚体に作用する床反力ベクトルとの
間の関係式も身体座標系の座標成分値だけで記述できる。従って、身体
10 座標系での床反力ベクトルの値を、2足歩行移動体の傾斜情報（鉛直方
向あるいは水平方向に対する傾斜情報）を把握することなく求めること
ができる。

また、床反力ベクトルの作用点は、例えば2足歩行移動体の足平部の
底部に圧力分布センサを備えることで、その検出出力から把握すること
15 も可能であるが、例えば次のような手法により推定することも可能であ
る。

前記身体座標系が固定された剛体要素に対応する2足歩行移動体の剛
体相当部の鉛直方向に対する傾斜角を逐次把握する第9ステップと、2
足歩行移動体の各脚体毎に該脚体が接地しているか否かを判断する第1
20 0ステップと、前記第1ステップで把握した2足歩行移動体の各関節の
変位量と前記剛体リンクモデルとを用いて少なくとも2足歩行移動体の
全体重心の位置ベクトルの前記身体座標系での値と接地している各脚体
の足首関節の位置ベクトルの前記身体座標系での値と該脚体の足平部の
中足趾節関節の位置ベクトルの前記身体座標系での値とを把握する第1
25 1ステップと、その把握した前記全体重心、接地している各脚体の足首
関節および該脚体の足平部の中足趾節関節のそれぞれの位置ベクトルの

値と前記第 9 ステップで把握した傾斜角とに基づいて少なくとも該全体重心、接地している各脚体の足首関節および該脚体の足平部の中足趾節関節の位置関係と該脚体の足首関節の鉛直方向位置を把握する第 1 2 ステップと、その把握した全体重心、接地している各脚体の足首関節および該脚体の足平部の中足趾節関節の位置関係に基づき該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置を推定すると共に該脚体の足首関節の鉛直方向位置に基づき該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置を推定する第 1 3 ステップとを備え、前記第 4 ステップは、該第 1 3 ステップで推定された床反力ベクトルの作用点の水平面内位置および鉛直方向位置と前記第 9 ステップで把握された傾斜角とに基づき前記身体座標系での作用点の位置ベクトルの値を把握する（第 5 発明）。

すなわち、2 足歩行移動体の接地している脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置は、その脚体の足首関節と中足趾節関節と 2 足歩行移動体の全体重心との相対的位置関係に密接に関係している。また、床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置は、脚体の足首関節の鉛直方向位置とほぼ一定の相関性を有する。従って、2 足歩行移動体の全体重心、接地している各脚体の足首関節および該脚体の足平部の中足趾節関節の位置関係に基づき該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置を把握することができると共に該脚体の足首関節の鉛直方向位置に基づき該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置を把握することができる。そして、その把握した水平面内位置および鉛直方向位置と身体座標系が固定された剛体要素に対応する 2 足歩行移動体の剛体相当部の鉛直方向に対する傾斜角とを用いることで、身体座標系での床反力ベクトルの作用点の位置ベクトルを求めることができる。

このように床反力作用点の位置ベクトルを推定する場合には、身体座

標系が固定された剛体要素に対応する2足歩行移動体の剛体相当部の鉛直方向に対する傾斜角を傾斜角検出用のセンサ（角速度センサや傾斜計）を用いて把握する必要がある。しかし、本発明では、その傾斜角は、床反力ベクトルの作用点を推定するためにだけ使用すればよいので、その傾斜角を用いる演算は必要最低限に抑えられる。従って、該傾斜角が誤差を有するような場合であっても、演算誤差の累積を最小限に抑えることができ、ひいては、関節モーメントの推定精度を十分な精度に確保できる。また、瞬間的に比較的大きな荷重がかかりやすい足平部の底部に圧力分布センサを設けずに済むため、関節モーメントの推定のための装置構成の耐久性上の利点もある。

なお、上記第5発明は前記第4発明と併用してもよい。この場合には、前記第11ステップで必要となる、身体座標系での全体重心の位置ベクトルの値は、第4発明の前記第6ステップで求めたものを使用すればよい。従って、第5発明の第10ステップでは、身体座標系での全体重心の位置ベクトルの値を改めて求める必要はない。

前記第5発明では、前記第3ステップおよび第4ステップでそれぞれ把握する床反力ベクトルの値およびその作用点の位置ベクトルの値が3次元の値であるときには、床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（2足歩行移動体の前後方向および左右方向での位置）は、次のように把握することができる。すなわち、前記第13ステップは、前記全体重心が接地している脚体の足首関節に対して2足歩行移動体の前後方向で後側に存在する場合には、該脚体の足首関節の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）として推定し、前記全体重心が接地している脚体の足平部の中足趾節関節に対して2足歩行移動体の前後方向で前側に存在する場合には、該脚体の足平部の中足趾節

関節の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）として推定し、前記全体重心が接地している脚体の足首関節に対して2足歩行移動体の前後方向で前側に存在し、且つ該脚体の足平部の中足趾節関節に対して後側に存在する場合には、該脚体の足首関節と中足趾節関節とを結ぶ線分上で前記全体重心と前後方向の位置が同一となる点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）を該脚体に作用するの床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）として推定する（第6発明）。

- すなわち、前記全体重心が接地している脚体の足首関節に対して2足歩行移動体の前後方向で後側に存在する場合には、該脚体は、通常、その足平部の踵で接地しており、その接地箇所は、該脚体の足首関節のほぼ直下に存在する。従って、この場合には、該脚体の足首関節の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）として推定できる。また、前記全体重心が接地している脚体の足平部の中足趾節関節に対して2足歩行移動体の前後方向で前側に存在する場合には、該脚体は、通常、その足平部のつま先で接地しており、その接地箇所は、該脚体の足平部の中足趾節関節のほぼ直下に存在する。従って、この場合には、該脚体の足平部の中足趾節関節の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）として推定できる。また、全体重心が接地している脚体の足首関節に対して2足歩行移動体の前後方向で前側に存在し、且つ該脚体の足平部の中足趾節関節に対して後側に存在する場合には、床反力ベクトルの作用点の前後方向での位置は全体重心の前後方向での位置とほぼ同じである。また、足平部

は、概ね足首関節から中足趾節関節まで延在する剛体とみなせるので、床反力ベクトルの作用点は、足首関節と中足趾節関節とを結ぶ線分を床面に投影した線分上に存在すると考えることができる。従って、この場合には、脚体の足首関節と中足趾節関節とを結ぶ線分上で前記全体重心
5 と前後方向の位置が同一となる点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置（前後方向および左右方向での位置）として推定することができる。

また、上記第5又は第6発明では、床反力作用点ベクトルの鉛直方向位置の推定に関しては、例えば、前記第13ステップは、接地している
10 脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置を、前記第12ステップで把握された脚体の足首関節の鉛直方向位置からあらかじめ定めた所定値だけ鉛直方向下方に離れた位置として推定する（第7発明）。すなわち、2足歩行移動体の歩行時等に接地している脚体の足首関節は、一般に床面から概ね一定の高さの位置に存在する。従って、脚体の足首
15 関節の鉛直方向位置から、あらかじめ定めた所定値（上記一定の高さに相当する所定値）だけ鉛直方向下方に離れた位置を床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置として推定できる。

接地している脚体の足首関節の床面からの高さは上記の如く概ね一定の高さであるが、2足歩行移動体の移動時に脚体の足平部の底面のつま
20 先側の部分だけが接地している状態では、該脚体の足首関節の床面からの高さは、該足平部の底面のほぼ全体または踵側の部分が接地している場合に較べて多少高くなる。従って、床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置の推定精度をより高める上では、第7発明で次のようにすることが好ましい。

25 すなわち、前記第10ステップでは、接地していると判断した脚体について、さらに該脚体の足平部のつま先側部分および踵側部分のそれぞれ

れ接地の有無を判断し、前記第12ステップでは、前記接地している脚
体の足首関節の鉛直方向位置に加えて該脚体の足平部の中足趾節関節の
鉛直方向位置を把握するようにする。そして、前記第13ステップでは、
前記第10ステップで足平部のつま先側部分および踵側部分のうちのつ
5 ま先側部分のみが接地していると判断されたときには、前記所定値の代
りに、前記第12ステップで把握した前記足首関節の鉛直方向位置と中
足趾節関節の鉛直方向位置とから求められる該足首関節と中足趾節関節
との鉛直方向の距離を用いて前記床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位
置を推定する（第8発明）。

10 これによれば、接地している脚体の足平部のつま先側部分だけが接地
していると判断される状態では、脚体の足首関節の鉛直方向位置から、
足首関節と中足趾節関節との鉛直方向距離だけ鉛直下方に離れた位置が
床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置として推定される。その結果、
床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置の推定精度を高めることができ
15 る。

以上説明した各発明では、前記第3ステップおよび第4ステップでそ
れぞれ把握する床反力ベクトルの値およびその作用点の位置ベクトルの
値は、3次元の値であることが好ましい（第9発明）。これによれば、
2 足歩行移動体の空間的な挙動に則して床反力ベクトルの値およびその
作用点の位置ベクトルの値を把握するので、それらを基に推定される関
20 節モーメントの推定精度を高めることができる。

図面の簡単な説明

図1は、本発明を2足歩行移動体としての人間に適用した実施形態で
25 の全体的装置構成を模式的に示す図、図2は図1の装置に備えたセンサ
ボックスの構成を示すブロック図、図3は実施形態で使用する剛体リン

クモデルの斜視図、図4は図2に示した演算処理装置の機能的手段を示すブロック図である。図5および図6はそれぞれ実施形態で用いる座標変換の変換テンソルの例を説明するための図、図7は2足歩行移動体の単脚支持状態での床反力ベクトルの推定手法を説明するための図、図8
5 (a), (b)は2足歩行移動体の両脚支持状態での床反力ベクトルの推定手法を説明するための図、図9(a)~(c)は床反力ベクトルの作用点の推定手法を説明するための図、図10は図9(b)の状態での床反力ベクトルの作用点のY軸方向成分の推定手法を説明するための図である。

10

発明を実施するための最良の形態

本発明の実施形態を図1~図10を参照して説明する。図1は本発明を2足歩行移動体としての人間に適用した実施形態での全体的装置構成を模式的に示す図である。同図に示すように、人間1は、その構成を大
15 別すると、左右一対の脚体2, 2と、胴体3と、左右一対の腕体4, 4と、頭部5とを有する。胴体3は、腰部6、腹部7、および胸部8から構成され、その腰部6が脚体2, 2のそれぞれに左右一対の股関節9, 9を介して連結されて両脚体2, 2上に支持されている。また、胴体3の胸部8の左右の両側部からそれぞれ腕体4, 4が延設されると共に、
20 胸部8の上端に頭部5が支持されている。各脚体2は、股関節9から延在する大腿部10と、該大腿部10の先端から膝関節11を介して延在する下腿部12と、該下腿部12の先端から足首関節13を介して延在する足平部14とを備えている。

本実施形態では、このような構成を有する人間1の各脚体2の各関節
25 9, 11, 13に作用する関節モーメントの推定を行うために、次のような装置を人間1に装備している。すなわち、腰部6の背面にはセンサ

ボックス 15 が図示しないベルト等の部材を介して装着されている。このセンサボックス 15 の内部には、図 2 のブロック図で示すように 3 軸方向の加速度（並進加速度）を検出する加速度センサ 16 と、3 軸方向（3 軸回り）の角速度を検出するジャイロセンサ 17 と、マイクロコンピュータを用いて構成された演算処理装置 18 と、後述する光ファイバ 26, 27 に導入する光を発光したり、戻り光を受光する発光／受光器 19 と、演算処理装置 18 等の各電装品の電源としてのバッテリー 20 とが収容されている。なお、加速度センサ 16 及びジャイロセンサ 17 は、センサボックス 15 を介して腰部 6 に固定され、腰部 6 と一体的に動くようになっている。

各脚体 2 の股関節 9、膝関節 11、足首関節 13 の部位には、それぞれの関節の変位量を検出する関節変位センサ 21, 22, 23 が図示しないベルト等の部材を介して装着されている。これらの各関節変位センサ 21, 22, 23 が検出する変位量は、各関節 9, 11, 13 の 3 軸回りの回転角であり、その検出は、ポテンショメータ等を用いて行われる。

また、各脚体 2 の足平部 14 の底面（詳しくは足平部 14 に装着した靴の底面）には、2 つの接地センサ 24, 25 が設けられている。接地センサ 24, 25 のうち、接地センサ 24 は足首関節 13 の直下の箇所（踵）に設けられ、接地センサ 25 は足平部 14 の中足趾節関節 14a（足平部 14 の親指の付け根の関節）の直下の箇所（つま先）に設けられている。これらの接地センサ 24, 25 は、それを設けた箇所が接地しているか否かを示す ON/OFF 信号を出力するセンサである。なお、各関節変位センサ 21, 22, 23、および接地センサ 24, 25 の検出出力は信号線（図示省略）を介してセンサボックス 15 の演算処理装置 18 に入力される。

さらに、図1に示す如く、センサボックス15から2本の光ファイバ26, 27が胴体3の背面沿いに上方に向かって延設され、その先端部がそれぞれ腹部7の背面、胸部8の背面に図示しないベルト等の部材を介して固定されている。光ファイバ26, 27は、それぞれ腰部6に対する腹部7、胸部8の傾き角（矢状面での傾き角）を検出する検出手段の構成要素である。これらの光ファイバ26, 27を用いた腹部7、胸部8の傾き角の計測は次のような手法により行われる。光ファイバ26を用いた腹部7の傾き角の計測手法を代表的に説明すると、該光ファイバ26には、センサボックス15内に設けられた発光／受光器19（図2に示す）から所定の強度の光が導入されると共に、その導入された光が該光ファイバ26の先端で反射されてセンサボックス15側に戻ってくるようになっている。そして、その光の戻り量（戻った光の強度）が前記発光／受光器19により検出されるようになっている。また、光ファイバ26には、微小な光漏れを許容する複数の刻み部（図示しない）が長手方向に間隔を存して設けられており、光ファイバ26に導入された光のうち、腰部6に対する腹部7の傾き角に応じた量の光がそれらの刻み部を介して光ファイバ26から漏出する。このため、センサボックス15側への光の戻り量は、腹部7の傾き角に応じたものとなり、その戻り量を検出することで、腰部6に対する腹部7の傾き角が計測される。すなわち、光ファイバ25の光の戻り量に応じた発光／受光器19の検出出力が、腰部6に対する腹部7の傾き角に応じたものとなり、それが該傾き角を示す信号として演算処理装置18に入力される。光ファイバ27を用いた胸部8の傾き角の計測手法も同様である。

なお、前記関節変位センサ21, 22, 23がそれぞれ検出する股関節9、膝関節11、足首関節13の回転角は、両足平部14, 14を平行に前方に向けて人間1が直立姿勢で起立した状態（以下、人間1の基

準姿勢状態という)を基準(ゼロ点)とする回転角である。光ファイバ26, 27を用いて検出する腹部7、胸部8の傾き角についても同様である。

ここで、本実施形態で用いる人間1の剛体リンクモデルと座標系とについて説明しておく。図3はその剛体リンクモデルS1と座標系とを示している。なお、この剛体リンクモデルS1は、前記図1にも仮想線で併記されている。本実施形態では、剛体リンクモデルS1は、人間1を、9個の剛体要素と8個の関節要素とで構成される連結体として表現している。さらに詳説すると、剛体リンクモデルS1は、大別すると、人間1の各脚体2にそれぞれ対応する一対の脚体部S2, S2と、人間1の上体(腰部6から上側の部分)に対応する上体部SUとから構成されている。上体部SUは、人間1の腰部6に対応する剛体要素S6と腹部7に対応する剛体要素S7とを関節要素JU1で連結し、さらに、剛体要素S7と胸部8に対応する剛体要素S8とを関節要素JU2で連結してなる連結体として構成されている。以下、剛体要素S6, S7, S8をそれぞれ腰部要素S6、腹部要素S7、胸部要素S8と称し、関節要素JU1、JU2をそれぞれ上体下部関節JU1、上体上部関節JU2と称することがある。

この場合、腰部要素S6は、逆T字形となっており、その上端に前記上体下部関節JU1が設けられると共に、左右の両端に人間1の一対の股関節9, 9に対応する一対の関節要素J9, J9(以下、単に股関節J9ということがある)が設けられている。つまり、腰部要素S6は、股関節J9, J9の間でそれらの中心を結ぶ線分方向(左右方向)に延在する部分S6aとこの部分S6aの中央から上体下部関節JU1に向かってほぼ上方に伸びる部分S6bとから構成されている。ここで、上体下部関節JU1は、人間1の腰部6と腹部7との境界付近で人間1の

背骨上に想定した関節に対応するものであり、上体上部関節 J U 2 は、腹部 7 と胸部 8 との境界付近で人間 1 の背骨上に想定した関節に対応するものである。人間 1 の胴体 3 の曲げ動作をつかさどる実際の背骨は多数の関節で構成されるが、剛体リンクモデル S 1 では、上体部 S U の曲
5 げ動作は、上体下部関節 J U 1 および上体上部関節 J U 2 の 2 つの関節要素で行われる。そして、腹部要素 S 7 は、上体下部関節 J U 1 と上体上部関節 J U 2 との間でそれらの中心を結ぶ線分方向に延在している。
なお、胸部要素 S 8 は、図 1 に示す如く、上体上部関節 J U 2 から人間 1 の首の付け根（より詳しくは胴体 3 と首との境界付近での背骨上の部
10 位）まで延在するものとされている。

剛体リンクモデル S 1 の各脚体部 S 2 は、大腿部 10 に対応する剛体要素 S 10 を前記股関節 J 9 を介して腰部要素 S 6 に連結し、下腿部 12 に対応する剛体要素 S 12 を膝関節 11 に対応する関節要素 J 11 を介して連結し、足平部 14 に対応する剛体要素 S 14 を足首関節 13 に
15 対応する関節要素 J 13 を介して連結してなる連結体として構成されている。以下、剛体要素 S 10、S 12、S 14 をそれぞれ大腿部要素 S 10、下腿部要素 S 12、足平部要素 S 14 と称し、関節要素 J 11、J 13 をそれぞれ単に膝関節 J 11、足首関節 J 13 と称することがある。

20 この場合、大腿部要素 S 10 および下腿部要素 S 12 は、それぞれの両端の関節要素の間でそれらの中心を結ぶ線分方向に延在している。また、足平要素 S 14 の先端は、人間 1 の足平部 14 の中足趾節関節 14 a（以下、MP 関節 14 a という）に対応しており、足平要素 S 14 は、
図 1 に示す如く、足首関節 13（J 13）から足平部 14 の中足趾節関
25 節 14 a（以下、MP 関節 14 a という）まで延在している。剛体リンクモデル S 1 では、足平要素 S 14 の先端は関節としての機能を持つも

のではないが、以下、便宜上、その先端をMP関節J14aと称することがある。

以上の如く構成された剛体リンクモデルS1の各剛体要素及び各関節要素は、各関節要素の回転運動によって、その相互の位置関係および姿勢関係（向きの関係）が各剛体要素および各関節要素に対応する人間1の各部の相互の位置関係および姿勢関係とほぼ同一になるように運動可能とされている。この場合、上体下部関節JU1及び上体上部関節JU2は、それぞれ3軸回りの回転が可能とされており、その中の1軸を計測軸として、その計測軸回りの回転（図3中に各関節要素JU1, JU2に対応して記載した矢印（回転方向を表す矢印））を計測するようにしている。その計測軸は、本実施形態では、前記一对の股関節J9, J9の中心を結ぶ線分（腰部要素S6の部分S6aの延在方向）と平行な軸である。また、各脚体部S2の股関節J9、膝関節J11、および足首関節J13はそれぞれ、左側の脚体部S2の各関節要素J9, J11, J13に関して代表的に図3中に記載した矢印（回転方向を表す矢印）で示す如く3軸回りの回転が可能とされている。

また、剛体リンクモデルS1では、その各剛体要素の重量および長さ（軸心方向の長さ）、各剛体要素の重心の位置（各剛体要素での位置）とがあらかじめ定められて、演算処理装置18の図示しないメモリに記憶保持されている。図3の黒点G8, G7, G6, G10, G12, G14はそれぞれ胸部要素S8、腹部要素S7、腰部要素S6、大腿部要素S10、下腿部要素S12、足平部要素S14の重心を例示的に示している。なお、腰部要素S6は前記したように逆T字形であるので、その長さについては、前記部分S6aの長さと部分S6bの長さがある。

各剛体要素の重量、長さ、重心の位置は、基本的にはそれぞれの剛体要素に対応する人間1の剛体相当部の重量、長さ、重心の位置とほぼ同

一に設定されている。例えば、大腿部要素 S 10 の重量、長さ、重心の位置は、それぞれ人間 1 の大腿部 10 の実際の重量、長さ、重心の位置とほぼ同一である。但し、重量および重心の位置は、人間 1 に本実施形態の装置を装備した状態での重量および重心の位置である。また、胸部要素 S 8 の重量および重心の位置は、人間 1 の胸部 8 と両腕体 4, 4 と頭部 5 とを合わせたものの重量および重心の位置である。補足すると、人間 1 の移動時の両腕体 4, 4 の運動（腕を前後に振る動作）に伴う胸部要素 S 8 の重心の位置変化は比較的小さく、該胸部要素 S 8 のほぼ一定の位置に維持される。また、各剛体要素の重心の位置は、各剛体要素にあらかじめ固定して設定された後述の要素座標系での位置ベクトルとして、該要素座標系の各座標成分値で設定されている。

各剛体要素の重量、長さ、重心の位置は、基本的には、人間 1 の各部の寸法や重量の実測値に基づいて定めればよいが、人間 1 の身長や体重から、人間の平均的な統計データに基づいて推定するようにしてもよい。一般に、各剛体要素に対応する人間 1 の剛体相当部の重心の位置や重量、長さは、人間の身長や体重（全体重量）と相関性があり、その相関関係に基づいて人間 1 の身長および体重の実測データから各剛体要素に対応する人間 1 の剛体相当部の重心の位置や重量、長さを比較的精度よく推定することが可能である。

なお、図 3 では、便宜上、各重心 G 8, G 7, G 6, G 10, G 12, G 14 は、それぞれに対応する剛体要素の軸心上に位置するように記載しているが、必ずしもその軸心上に位置するとは限らず、その軸心からずれた位置に存在してもよい。

本実施形態では、剛体リンクモデル S 1 に対して、次のような座標系があらかじめ設定されている。すなわち、図 3 に示す如く身体座標系 B C が腰部要素 S 6 に固定して設定されている。この身体座標系 B C は、

一对の股関節 J 1 1, J 1 1 の中心を結ぶ線分の中点 (腰部要素 S 6 の部分 S 6 a の中央点) を原点とし、その線分の方角を Y 軸、原点から上体下部関節 J U 1 の中心に向かう方角を Z 軸、これらの Y 軸および Z 軸に直交する方角を X 軸とする 3 次元座標系 (X Y Z 座標系) として設定されている。人間 1 の前記基準姿勢状態では、身体座標系 B C の X 軸、Y 軸、Z 軸はそれぞれ人間 1 の前後方角、左右方角、上下方角 (鉛直方角) に向き、X Y 平面は水平面である。

また、各剛体要素には、例えば参照符号 C 8, C 7, C 6, C 1 0, C 1 2, C 1 4 で示すように要素座標系が固定的に設定されている。本実施形態では、腰部要素 S 6 の要素座標系 C 6 は身体座標系 B C と同一とされている。また、胸部要素 S 8、腹部要素 S 7、各大腿部要素 S 1 0、各下腿部要素 S 1 2、および各足平部要素 S 1 4 のそれぞれの要素座標系 C 8, C 7, C 1 0, C 1 2, C 1 4 はそれぞれ、上体上部関節 J U 2、上体下部関節 J U 1、膝関節 J 1 1、足首関節 J 1 3、MP 関節 J 1 4 a の中心点を原点とする 3 次元座標系 (X Y Z 座標系) とされている。別の言い方をすれば、各脚体部 S 2 については、その各剛体要素 S 1 0, S 1 2, S 1 4 の要素座標系 C 1 0, C 1 2, C 1 4 は、各剛体要素 S 1 0, S 1 2, S 1 4 の両端の関節要素のうち、腰部要素 S 6 からより遠い側の関節要素の中心点を原点としている。また、上体部 S U の腹部要素 S 7 および胸部要素 S 8 のそれぞれの要素座標系 C 7, C 8 は、腹部要素 S 7 および胸部要素 S 8 のそれぞれの両端の関節要素のうち、腰部要素 S 6 により近い側の関節要素の中心点を原点としている。なお、図 3 では、要素座標系 C 1 0, C 1 2, C 1 4 は図示の便宜上、右側脚体部 S 2 についてのみ図示しているが、左側脚体部 S 2 についても右側脚体部 S 2 と同様に要素座標系が設定されている。

また、要素座標系 C 8, C 7 は、それぞれ胸部要素 S 8、腹部要素 S

7の延在方向（軸心方向）にZ軸が設定されると共に、Y軸が身体座標系BCのY軸と同一方向に設定されている。また、要素座標系C10, C12, C14はそれぞれ大腿部要素S10、下腿部要素S12、足平部要素S14の延在方向（軸心方向）にZ軸が設定されると共に、Y軸
5 が股関節J9、膝関節J11及び足首関節J13のそれぞれの中心点を含む平面（以下、脚平面ということがある）の法線方向に設定されている。上記のいずれの要素座標系C8, C7, C10, C12, C14でも、X軸はY軸及びZ軸に直交する方向に設定されている。以下の説明では、各要素座標系C8, C7, C6, C10, C12, C14をそれ
10 ぞれ胸部座標系C8、腹部座標系C7、腰部座標系C6、大腿部座標系C10、下腿部座標系C12、足平部座標系C14と称することがある。

なお、要素座標系C8, C7, C10, C12, C14は、必ずしも上記の如く設定する必要はなく、基本的にはその原点や各軸の向きの設定は任意でよい。

15 図4は前記演算処理装置18の演算処理機能を示すブロック図である。同図に示すように、演算処理装置18は、前記各関節変位センサ21, 22, 23および発光／受光器19の検出出力を基に後述する座標変換のための変換テンソルを作成する変換テンソル作成手段28と、その変換テンソルを用いて前記剛体リンクモデルS1の各関節要素および各剛
20 体要素の重心の身体座標系BCでの位置ベクトルの値（座標成分値）を求める関節・要素重心位置算出手段29と、前記加速度センサ16及びジャイロセンサ17の検出出力を基に身体座標系BCの原点の加速度ベクトル（並進加速度）の値（身体座標系BCでの座標成分値）を求める身体座標系加速度算出手段30と、前記加速度センサ16及びジャイロ
25 センサ17の検出出力を基に身体座標系BCの鉛直方向に対する傾斜角を算出する身体座標系傾斜角算出手段31とを備えている。

さらに演算処理装置18は、関節・要素重心位置算出手段29が求めた各剛体要素の重心の位置ベクトルの値を用いて身体座標系BCでの剛体リンクモデルS1の全体重心（人間1の全体重心）の位置ベクトルの値を求めると共に、その位置ベクトルの値の時系列データと身体座標系

5 加速度算出手段30が求めた身体座標系BCの原点の加速度ベクトルの値とを用いて該全体重心の加速度ベクトル（並進加速度）の値（身体座標系BCでの座標成分値）を求める全体／要素重心運動算出手段32を備えている。なお、全体／要素重心運動算出手段30では、関節・要素重心位置算出手段29が求めた各大腿部要素S10、下腿部要素S12

10 および足平部要素S12のそれぞれの重心の位置ベクトルの値の時系列データと身体座標系加速度算出手段30が求めた身体座標系BCの原点の加速度ベクトルの値とを用いて各大腿部要素S10、下腿部要素S12および足平部要素S14の重心の加速度ベクトル（並進加速度）の値（身体座標系BCでの座標成分値）も求められる。

15 また、演算処理装置18は、関節・要素重心位置算出手段29が求めた各足首関節J13の位置ベクトルの値と全体／要素重心運動算出手段32が求めた全体重心の位置ベクトルの値およびその加速度ベクトルの値と前記接地センサ24、25の検出出力とを用いて人間1の各脚体2、2に作用する床反力ベクトル（並進床反力）の身体座標系BCでの値

20 （座標成分値）を推定する床反力推定手段33と、関節・要素重心位置算出手段29が求めた各足首関節J13および各MP関節J14aの位置ベクトルの値と身体座標系傾斜角算出手段31が求めた身体座標系BCの傾斜角と全体／要素重心運動算出手段32が求めた全体重心の位置ベクトルの値と接地センサ24、25の検出出力とを用いて各脚体2に

25 作用する床反力ベクトルの作用点（以下、単に床反力作用点という）の位置ベクトルの身体座標系BCでの値（座標成分値）を求める床反力作

用点推定手段34とを備える。

そして、演算処理装置18は、変換テンソル作成手段28が作成した変換テンソルと全体／要素重心運動算出手段30が求めた各大腿部要素S10、下腿部要素S12、足平部要素S14のそれぞれの重心の加速度ベクトルと床反力推定手段33が求めた床反力ベクトルの値と床反力作用点推定手段34が求めた床反力作用点の位置ベクトルの値とを用いて各脚体2の足首関節13、膝関節11および股関節9に作用する関節モーメントを推定する関節モーメント推定手段35を備えている。

詳細は後述するが、演算処理装置18は、上記各手段28～35の演算処理を所定の演算処理周期で逐次実行し、各演算処理周期において最終的に関節モーメント推定手段35により関節モーメントの推定値を逐次算出する。

次に演算処理装置18の各手段の詳細な演算処理と併せて本実施形態の装置の作動を説明する。なお、以下の説明において、一般的に、ベクトル量のある座標系Caから別の座標系Cbに座標変換する変換テンソル、すなわち座標系Caの成分値で表されるベクトル量を座標系Cbの成分値で表されるベクトル量に変換するテンソルを「 $R(Ca \rightarrow Cb)$ 」というように表記する。また、ある座標系Caで見たある点Pもしくは部位Pの位置ベクトルを $U(P/Ca)$ というように表記する。また、ある座標系Caの座標成分値で表される、物体Qもしくは部位Qの作用力、加速度等の物理量のベクトルAを $A(Q/Ca)$ というように表記する。この場合、位置ベクトル $U(P/Ca)$ や、物理量ベクトル $A(Q/Ca)$ の座標系Caでの座標成分値を表すときは、各座標軸の名称であるx、y、zをさらに付加して表記する。例えば、位置ベクトル $U(P/Ca)$ のX座標成分は、 $U(P/Ca)_x$ というように表記する。

また、前記各要素座標系C8、C7、C6、C10、C12、C14

をそれぞれ対応する部位の名称を用いてC__胸部、C__腹部、C__腰部、C__大腿部、C__下腿部、C__足平部と称することがある。このことは、各剛体要素S 8, S 7, S 6, S 10, S 12, S 14、各剛体要素Sの重心G 8, G 7, G 6, G 10, G 12, G 14についても同様とする。
5 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1041 1042 1043 1044 1045 1046 1047 1048 1049 1050 1051 1052 1053 1054 1055 1056 1057 1058 1059 1060 1061 1062 1063 1064 1065 1066 1067 1068 1069 1070 1071 1072 1073 1074 1075 1076 1077 1078 1079 1080 1081 1082 1083 1084 1085 1086 1087 1088 1089 1090 1091 1092 1093 1094 1095 1096 1097 1098 1099 1100 1101 1102 1103 1104 1105 1106 1107 1108 1109 1110 1111 1112 1113 1114 1115 1116 1117 1118 1119 1120 1121 1122 1123 1124 1125 1126 1127 1128 1129 1130 1131 1132 1133 1134 1135 1136 1137 1138 1139 1140 1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1150 1151 1152 1153 1154 1155 1156 1157 1158 1159 1160 1161 1162 1163 1164 1165 1166 1167 1168 1169 1170 1171 1172 1173 1174 1175 1176 1177 1178 1179 1180 1181 1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1190 1191 1192 1193 1194 1195 1196 1197 1198 1199 1200 1201 1202 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1210 1211 1212 1213 1214 1215 1216 1217 1218 1219 1220 1221 1222 1223 1224 1225 1226 1227 1228 1229 1230 1231 1232 1233 1234 1235 1236 1237 1238 1239 1240 1241 1242 1243 1244 1245 1246 1247 1248 1249 1250 1251 1252 1253 1254 1255 1256 1257 1258 1259 1260 1261 1262 1263 1264 1265 1266 1267 1268 1269 1270 1271 1272 1273 1274 1275 1276 1277 1278 1279 1280 1281 1282 1283 1284 1285 1286 1287 1288 1289 1290 1291 1292 1293 1294 1295 1296 1297 1298 1299 1300 1301 1302 1303 1304 1305 1306 1307 1308 1309 1310 1311 1312 1313 1314 1315 1316 1317 1318 1319 1320 1321 1322 1323 1324 1325 1326 1327 1328 1329 1330 1331 1332 1333 1334 1335 1336 1337 1338 1339 1340 1341 1342 1343 1344 1345 1346 1347 1348 1349 1350 1351 1352 1353 1354 1355 1356 1357 1358 1359 1360 1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368 1369 1370 1371 1372 1373 1374 1375 1376 1377 1378 1379 1380 1381 1382 1383 1384 1385 1386 1387 1388 1389 1390 1391 1392 1393 1394 1395 1396 1397 1398 1399 1400 1401 1402 1403 1404 1405 1406 1407 1408 1409 1410 1411 1412 1413 1414 1415 1416 1417 1418 1419 1420 1421 1422 1423 1424 1425 1426 1427 1428 1429 1430 1431 1432 1433 1434 1435 1436 1437 1438 1439 1440 1441 1442 1443 1444 1445 1446 1447 1448 1449 1450 1451 1452 1453 1454 1455 1456 1457 1458 1459 1460 1461 1462 1463 1464 1465 1466 1467 1468 1469 1470 1471 1472 1473 1474 1475 1476 1477 1478 1479 1480 1481 1482 1483 1484 1485 1486 1487 1488 1489 1490 1491 1492 1493 1494 1495 1496 1497 1498 1499 1500 1501 1502 1503 1504 1505 1506 1507 1508 1509 1510 1511 1512 1513 1514 1515 1516 1517 1518 1519 1520 1521 1522 1523 1524 1525 1526 1527 1528 1529 1530 1531 1532 1533 1534 1535 1536 1537 1538 1539 1540 1541 1542 1543 1544 1545 1546 1547 1548 1549 1550 1551 1552 1553 1554 1555 1556 1557 1558 1559 1560 1561 1562 1563 1564 1565 1566 1567 1568 1569 1570 1571 1572 1573 1574 1575 1576 1577 1578 1579 1580 1581 1582 1583 1584 1585 1586 1587 1588 1589 1590 1591 1592 1593 1594 1595 1596 1597 1598 1599 1600 1601 1602 1603 1604 1605 1606 1607 1608 1609 1610 1611 1612 1613 1614 1615 1616 1617 1618 1619 1620 1621 1622 1623 1624 1625 1626 1627 1628 1629 1630 1631 1632 1633 1634 1635 1636 1637 1638 1639 1640 1641 1642 1643 1644 1645 1646 1647 1648 1649 1650 1651 1652 1653 1654 1655 1656 1657 1658 1659 1660 1661 1662 1663 1664 1665 1666 1667 1668 1669 1670 1671 1672 1673 1674 1675 1676 1677 1678 1679 1680 1681 1682 1683 1684 1685 1686 1687 1688 1689 1690 1691 1692 1693 1694 1695 1696 1697 1698 1699 1700 1701 1702 1703 1704 1705 1706 1707 1708 1709 1710 1711 1712 1713 1714 1715 1716 1717 1718 1719 1720 1721 1722 1723 1724 1725 1726 1727 1728 1729 1730 1731 1732 1733 1734 1735 1736 1737 1738 1739 1740 1741 1742 1743 1744 1745 1746 1747 1748 1749 1750 1751 1752 1753 1754 1755 1756 1757 1758 1759 1760 1761 1762 1763 1764 1765 1766 1767 1768 1769 1770 1771 1772 1773 1774 1775 1776 1777 1778 1779 1780 1781 1782 1783 1784 1785 1786 1787 1788 1789 1790 1791 1792 1793 1794 1795 1796 1797 1798 1799 1800 1801 1802 1803 1804 1805 1806 1807 1808 1809 1810 1811 1812 1813 1814 1815 1816 1817 1818 1819 1820 1821 1822 1823 1824 1825 1826 1827 1828 1829 1830 1831 1832 1833 1834 1835 1836 1837 1838 1839 1840 1841 1842 1843 1844 1845 1846 1847 1848 1849 1850 1851 1852 1853 1854 1855 1856 1857 1858 1859 1860 1861 1862 1863 1864 1865 1866 1867 1868 1869 1870 1871 1872 1873 1874 1875 1876 1877 1878 1879 1880 1881 1882 1883 1884 1885 1886 1887 1888 1889 1890 1891 1892 1893 1894 1895 1896 1897 1898 1899 1900 1901 1902 1903 1904 1905 1906 1907 1908 1909 1910 1911 1912 1913 1914 1915 1916 1917 1918 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925 1926 1927 1928 1929 1930 1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030 2031 2032 2033 2034 2035 2036 2037 2038 2039 2040 2041 2042 2043 2044 2045 2046 2047 2048 2049 2050 2051 2052 2053 2054 2055 2056 2057 2058 2059 2060 2061 2062 2063 2064 2065 2066 2067 2068 2069 2070 2071 2072 2073 2074 2075 2076 2077 2078 2079 2080 2081 2082 2083 2084 2085 2086 2087 2088 2089 2090 2091 2092 2093 2094 2095 2096 2097 2098 2099 2100 2101 2102 2103 2104 2105 2106 2107 2108 2109 2110 2111 2112 2113 2114 2115 2116 2117 2118 2119 2120 2121 2122 2123 2124 2125 2126 2127 2128 2129 2130 2131 2132 2133 2134 2135 2136 2137 2138 2139 2140 2141 2142 2143 2144 2145 2146 2147 2148 2149 2150 2151 2152 2153 2154 2155 2156 2157 2158 2159 2160 2161 2162 2163 2164 2165 2166 2167 2168 2169 2170 2171 2172 2173 2174 2175 2176 2177 2178 2179 2180 2181 2182 2183 2184 2185 2186 2187 2188 2189 2190 2191 2192 2193 2194 2195 2196 2197 2198 2199 2200 2201 2202 2203 2204 2205 2206 2207 2208 2209 2210 2211 2212 2213 2214 2215 2216 2217 2218 2219 2220 2221 2222 2223 2224 2225 2226 2227 2228 2229 2230 2231 2232 2233 2234 2235 2236 2237 2238 2239 2240 2241 2242 2243 2244 2245 2246 2247 2248 2249 2250 2251 2252 2253 2254 2255 2256 2257 2258 2259 2260 2261 2262 2263 2264 2265 2266 2267 2268 2269 2270 2271 2272 2273 2274 2275 2276 2277 2278 2279 2280 2281 2282 2283 2284 2285 2286 2287 2288 2289 2290 2291 2292 2293 2294 2295 2296 2297 2298 2299 2300 2301 2302 2303 2304 2305 2306 2307 2308 2309 2310 2311 2312 2313 2314 2315 2316 2317 2318 2319 2320 2321 2322 2323 2324 2325 2326 2327 2328 2329 2330 2331 2332 2333 2334 2335 2336 2337 2338 2339 2340 2341 2342 2343 2344 2345 2346 2347 2348 2349 2350 2351 2352 2353 2354 2355 2356 2357 2358 2359 2360 2361 2362 2363 2364 2365 2366 2367 2368 2369 2370 2371 2372 2373 2374 2375 2376 2377 2378 2379 2380 2381 2382 2383 2384 2385 2386 2387 2388 2389 2390 2391 2392 2393 2394 2395 2396 2397 2398 2399 2400 2401 2402 2403 2404 2405 2406 2407 2408 2409 2410 2411 2412 2413 2414 2415 2416 2417 2418 2419 2420 2421 2422 2423 2424 2425 2426 2427 2428 2429 2430 2431 2432 2433 2434 2435 2436 2437 2438 2439 2440 2441 2442 2443 2444 2445 2446 2447 2448 2449 2450 2451 2452 2453 2454 2455 2456 2457 2458 2459 2460 2461 2462 2463 2464 2465 2466 2467 2468 2469 2470 2471 2472 2473 2474 2475 2476 2477 2478 2479 2480 2481 2482 2483 2484 2485 2486 2487 2488 2489 2490 2491 2492 2493 2494 2495 2496 2497 2498 2499 2500 2501 2502 2503 2504 2505 2506 2507 2508 2509 2510 2511 2512 2513 2514 2515 2516 2517 2518 2519 2520 2521 2522 2523 2524 2525 2526 2527 2528 2529 2530 2531 2532 2533 2534 2535 2536 2537 2538 2539 2540 2541 2542 2543 2544 2545 2546 2547 2548 2549 2550 2551 2552 2553 2554 2555 2556 2557 2558 2559 2560 2561 2562 2563 2564 2565 2566 2567 2568 2569 2570 2571 2572 2573 2574 2575 2576 2577 2578 2579 2580 2581 2582 2583 2584 2585 2586 2587 2588 2589 2590 2591 2592 2593 2594 2595 2596 2597 2598 2599 2600 2601 2602 2603 2604 2605 2606 2607 2608 2609 2610 2611 2612 2613 2614 2615 2616 2617 2618 2619 2620 2621 2622 2623 2624 2625 2626 2627 2628 2629 2630 2631 2632 2633 2634 2635 2636 2637 2638 2639 2640 2641 2642 2643 2644 2645 2646 2647 2648

素 S 7 と胸部要素 S 8 との傾斜角（詳しくは腰部要素座標系 C 6 の Z 軸方向に対する矢状面（X Z 平面）上での傾斜角）が把握される。そして、これらの把握された回転角および傾斜角を用いて、剛体要素の要素座標系の間でベクトル量の座標変換を行うための変換テンソルが作成される。

- 5 この要素座標系間変換テンソルは、本実施形態では、足平部座標系 C 1 4 から下腿部座標系 C 1 2 への変換テンソル $R(C_足平部 \rightarrow C_下腿部)$ と、下腿部座標系 C 1 2 から大腿部座標系 C 1 0 への変換テンソル $R(C_下腿部 \rightarrow C_大腿部)$ と、大腿部座標系 C 1 0 から腰部座標系 C 6 への変換テンソル $R(C_大腿部 \rightarrow C_腰部)$ と、腹部座標系 C 7 から
- 10 腰部座標系 C 6 への変換テンソル $R(C_腹部 \rightarrow C_腰部)$ と、胸部座標系 C 8 から腰部座標系 C 6 への変換テンソル $R(C_胸部 \rightarrow C_腰部)$ とから構成される。なお、 $R(C_足平部 \rightarrow C_下腿部)$ 、 $R(C_下腿部 \rightarrow C_大腿部)$ 、 $R(C_大腿部 \rightarrow C_腰部)$ は、左右の脚体部 S 2 毎に各別に作成される。
- 15 ここで作成される要素座標系間変換テンソルの一例を示すと、例えば図 5 に示すように膝関節 1 1 の関節変位センサ 2 2 の検出出力から把握される膝関節 1 1 の回転角（膝関節 J 1 1 の回転角）が、大腿部座標系 C 1 0 の Y 軸（図 5 の紙面に垂直な軸）回りに θ_y であるとする。但し、この例では要素座標系 C 1 0 の X 軸回り、Z 軸回りの膝関節 1 1 の回転
- 20 角は 0 であるとする。また、膝関節 1 1 の Y 軸回り回転角は、脚体 2 が伸びる方向を正方向としており、図示の例では $\theta_y < 0$ である。このとき、変換テンソル $R(C_下腿部 \rightarrow C_大腿部)$ は、次式（1）の如く 3 次の行列で表される。

$$R(C_下腿部 \rightarrow C_大腿部) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

なお、図5の例では、膝関節11の1軸回り（Y軸回り）の回転のみを想定したため、変換テンソル $R(C_下腿部 \rightarrow C_大腿部)$ は式（1）のような簡単な行列で表されるが、一般にはより複雑な形式になる。

- 5 また、例えば変換テンソル $R(C_腹部 \rightarrow C_腰部)$ は、腰部6に対する腹部7の傾斜角を θ_y （但し傾斜角 θ_y は人間1の前方側への傾斜方向を正方向とする）とおくと、前記式（1）の右辺の行列と同じ形の行列で表される。変換テンソル $R(C_胸部 \rightarrow C_腰部)$ も同様である。補足すると、本実施形態では、剛体リンクモデルS1の上体下部関節J
- 10 U1および上体上部関節JU2を1軸回り（ $C_腹部$ および $C_胸部$ のY軸回り）の回転による腹部要素S7および胸部要素S8の腰部要素S6に対する傾斜角を計測するようにしたため、変換テンソル $R(C_腹部 \rightarrow C_腰部)$ および $R(C_胸部 \rightarrow C_腰部)$ は常に前記式（1）の右辺の行列と同じ形の行列で表される。但し、上体下部関節JU1および上体上部関節JU2をそれぞれ例えば2軸回り（例えば $C_腹部$ および $C_胸部$ のY軸とX軸との2軸回り）の回転が可能なものとして、腹部要素S7および胸部要素S8の2軸回りの傾斜角を計測するようにしてもよい。
- 15

- 次いで、上記の如く求めた要素座標系間変換テンソルから、各要素座
- 20 標系で記述された（各要素座標系の座標成分値で記述された）ベクトル量を身体座標系BCに座標変換する（ベクトル量を身体座標系BCの座標成分値での記述に変換する）ための変換テンソルが求められる。

この場合、本実施形態では腰部座標系C6（ $C_腰部$ ）は身体座標系BCに等しいものとしたので、 $C_腰部$ から身体座標系BCへの変換テ

ンソル $R(C_腰部 \rightarrow BC)$ は 3 次の単位行列で表される。また、腹部座標系 $C7$ ($C_腹部$) および胸部座標系 $C8$ ($C_胸部$) のそれぞれから身体座標系 BC への変換テンソル $R(C_腹部 \rightarrow BC)$, $R(C_胸部 \rightarrow BC)$ は、それぞれ先に求めた要素座標系間変換テンソル $R(C_腹部 \rightarrow C_腰部)$, $R(C_胸部 \rightarrow C_腰部)$ と同一である。そして、他の要素座標系 $C10$ ($C_大腿部$), $C12$ ($C_下腿部$), $C14$ ($C_足平部$) から身体座標系 BC への変換テンソルは、次式 (2a) ~ (2c) の如く、腰部要素 $S6$ 寄りのものから順番に決定される。

$$R(C_大腿部 \rightarrow BC) = R(C_腰部 \rightarrow BC) \times R(C_大腿部 \rightarrow C_腰部) \quad \dots\dots (2a)$$

$$R(C_下腿部 \rightarrow BC) = R(C_大腿部 \rightarrow BC) \times R(C_下腿部 \rightarrow C_大腿部) \quad \dots\dots (2b)$$

$$R(C_足平部 \rightarrow BC) = R(C_下腿部 \rightarrow BC) \times R(C_足平部 \rightarrow C_下腿部) \quad \dots\dots (2c)$$

なお、 $R(C_大腿部 \rightarrow BC)$, $R(C_下腿部 \rightarrow BC)$, $R(C_足平部 \rightarrow BC)$ は、各脚体部 $S2$ 毎に各別に求められる。補足すると、各要素座標系から身体座標系 BC への変換テンソルを転置したものが逆変換 (身体座標系 BC から該要素座標系への座標変換) を行うための変換テンソルとなる。例えば $R(BC \rightarrow C_大腿部) = R(C_大腿部 \rightarrow BC)^T$ (T は転置を意味する) である。

上記変換テンソル作成手段 28 の演算処理に続く関節・重心位置算出手段 29 の演算処理では、上記の如く求めた変換テンソルと、あらかじめメモリに記憶された各剛体要素の長さおよび重心位置 (各要素座標系での位置) とから各関節要素および各剛体要素の重心の身体座標系 BC での位置ベクトルが求められる。なお、ここで位置ベクトルを求める関節要素には前記 MP 関節 $J14a$ が含まれる。

各関節要素の位置ベクトルの算出は次のように行われる。例えば左側脚部部 S 2 の各関節要素 J 9, J 11, J 13 の位置ベクトルの算出を例に採って説明する。腰部要素 S 6 の、両股関節 J 9, J 9 間の部分 S 6 a 長さを L 6 a とおくと、C __腰部における左側股関節 J 9 の位置ベ
 5 クトル $U(J_左股/C_腰部)$ は、 $(0, L 6 a / 2, 0)^T$ である。従って、身体座標系 B C における左側股関節 J 9 の位置ベクトル $U(J_左股/B C)$ は、次式 (3) により求められる。

$$\begin{aligned} U(J_左股/BC) &= R(C_腰部 \rightarrow BC) \times U(J_左股/C_腰部) \\ &= R(C_腰部 \rightarrow BC) \times (0, L 6 a / 2, 0)^T \\ 10 \qquad \qquad \qquad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

さらに、左側大腿部要素 S 10 の長さを L 10 とおくと、左側大腿部座標系 C 10 (C __左大腿部) における左側股関節 J 9 の位置ベクトル $U(J_左股/C_左大腿部)$ は、 $(0, 0, L 10)^T$ であるから、身体座標系 B C における左側膝関節 J 11 の位置ベクトル $U(J_左膝/B$
 15 C) は、次式 (4) により求められる。

$$\begin{aligned} U(J_左膝/BC) &= U(J_左股/BC) \\ &\quad + R(C_左大腿部 \rightarrow BC) \times (-U(J_左股/C_左大腿部)) \\ &= U(J_左股/BC) \\ &\quad + R(C_左大腿部 \rightarrow BC) \times (0, 0, -L 10)^T \\ 20 \qquad \qquad \qquad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

以下同様にして、左側足首関節 J 13、左側 M P 関節 J 14 a の身体座標系 B C での位置ベクトル $U(J_左足首/BC)$ 、 $U(J_左 M P/BC)$ がそれぞれ次式 (5), (6) により順番に算出される。

$$\begin{aligned} U(J_左足首/BC) &= U(J_左膝/BC) \\ 25 \qquad \qquad \qquad &\quad + R(C_下腿 \rightarrow BC) \times (-U(J_左膝/C_左下腿部)) \\ &= U(J_左膝/BC) \end{aligned}$$

$$+ R(C_下腿 \rightarrow BC) \times (0, 0, -L_{12})^T$$

..... (5)

$$U(J_左MP/BC) = U(J_左足首/BC)$$

$$+ R(C_左足平部 \rightarrow BC) \times (-U(J_左足首/C_左足平部))$$

$$= U(J_左足首/BC)$$

$$+ R(C_左足平部 \rightarrow BC) \times (0, 0, -L_{14})^T$$

..... (6)

なお、式(5)の L_{12} 、式(6)の L_{14} はそれぞれ左側下腿部要素 S_{12} 、左側足平部要素 S_{14} の長さである。右側脚体部 S_2 の各関節要素の位置ベクトルも上記と同様に求められる。

さらに、上体部 S_U の各関節要素の位置ベクトルも上記と同様に求められる。すなわち、上体下部関節 J_{U1} および上体上部関節 J_{U2} の身体座標系 BC での位置ベクトルは、それぞれ次式(7)、(8)により順番に求められる。

$$U(J_{U1}/BC) = R(C_腰部 \rightarrow BC) \cdot U(J_{U1}/C_腰部)$$

$$= R(C_腰部 \rightarrow BC) \cdot (0, 0, L_{6b})^T$$

..... (7)

$$U(J_{U2}/BC) = U(J_{U1}/BC) + R(C_腹部 \rightarrow BC) \cdot U(J_{U2}/C_腹部)$$

$$= U(J_{U1}/BC) + R(C_腹部 \rightarrow BC) \cdot (0, 0, L_7)^T$$

..... (8)

なお、式(7)の L_{6b} は、腰部要素 S_6 の部分 S_{6b} の長さである。また、式(8)の L_7 は腹部要素 S_7 の長さである。

また、各剛体要素の重心の、身体座標系 BC での位置ベクトルの算出は次のように行われる。すなわち、腰部要素 S_6 、大腿部要素 S_{10} 、下腿部要素 S_{12} 、足平部要素 S_{14} のそれぞれの重心の身体座標系 BC での位置ベクトル $U(G_腰部/BC)$ 、 $U(G_大腿部/BC)$ 、 $U(G_下$

腿部/BC), $U(G_足平部/BC)$ は、それぞれ前記式(3)～(6)の右
 辺の $U(J_左股/C_腰部)$ 、 $U(J_左股/C_左大腿部)$ 、 $U(J_左膝/$
 $C_左下腿部)$ 、 $U(J_左足首/C_左足平部)$ を、それぞれ各要素座標
 系であらかじめ設定されている各剛体要素の重心の位置ベクトル $U(G$
 5 $_腰部/C_腰部)$ 、 $U(G_大腿部/C_大腿部)$ 、 $U(G_下腿部/C_下$
 $腿部)$ 、 $U(G_足平部/C_足平部)$ で置き換えた式を演算することで
 求められる。なお、 $G_大腿部$ 、 $G_下腿部$ 、 $G_足平部$ の位置ベクト
 ルの算出は、各脚体部S2毎に各別に行われる。

また、腹部要素S7、胸部要素S8のそれぞれの重心G7、G8の身
 10 体座標系BCでの位置ベクトル $U(G_腹部/BC)$ 、 $U(G_胸部/BC)$ は、
 それぞれ次式(9)、(10)により求められる。

$$U(G_腹部/BC) = U(JU1/BC) \\ + R(C_腹部 \rightarrow BC) \cdot U(G_腹部/C_腹部) \\ \dots\dots (9)$$

$$15 \quad U(G_胸部/BC) = U(JU2/BC) \\ + R(C_胸部 \rightarrow BC) \cdot U(G_胸部/C_胸部) \\ \dots\dots (10)$$

以上が変換テンソル作成手段28および関節・要素重心位置算出手段
 29の演算処理である。なお、以上のように関節・要素重心位置算出手
 20 段29で算出される各関節要素と各剛体要素の重心との位置ベクトルは、
 それぞれに対応する人間1の実際の部位の、身体座標系BCで見た位置
 ベクトルとしての意味を持つ。

演算処理装置18は、上記した変換テンソル作成手段28および関
 節・要素重心位置算出手段29の演算処理と並行して、身体座標系加速
 25 度算出手段30および身体座標系傾斜角算出手段31の演算処理を実行
 する。

身体座標系加速度算出手段 30 の演算処理では、加速度センサ 16 の
 検出出力から把握される 3 軸方向の加速度（並進加速度）とジャイロセ
 ンサ 17 の検出出力から把握される 3 軸回りの角速度とから次のように
 身体座標系 B C の原点の加速度ベクトルの身体座標系 B C での値（座標
 5 成分値）が求められる。まず、各センサ 16, 17 がそれぞれ検出する
 加速度、角速度はそれらのセンサ 16, 17 に対して固定された 3 軸の
 座標系（以下、センサ座標系 S C 又は C_ センサという）であらわされ
 るベクトル量であるので、それを身体座標系 B C での値に変換する。そ
 の変換は、腰部 6 に対する加速度センサ 16 およびジャイロセンサ（角
 10 速度センサ） 17 の相対的な取り付け位置関係（腰部座標系 C 6（＝身
 体座標系 B C）に対するセンサ座標系 S C の相対的姿勢関係）に応じて
 あらかじめ設定された変換テンソルをセンサ座標系 S C でそれぞれ検出
 された加速度ベクトル、角速度ベクトルに乗算することで行われる。す
 なわち、センサ座標系 S C での加速度ベクトルの検出値を $ACC(\text{センサ}/$
 15 $S C)$ 、それを身体座標系 B C に変換した加速度ベクトルを $ACC(\text{センサ}/$
 $B C)$ 、センサ座標系 S C での角速度ベクトルの検出値を $\omega(\text{センサ}/$
 $S C)$ 、それを身体座標系 B C に変換した角速度ベクトルを $\omega(\text{センサ}/$
 $B C)$ とおくと、加速度ベクトル $ACC(\text{センサ}/B C)$ 、角速度ベクトル ω
 $(\text{センサ}/B C)$ は、それぞれ次式 (11), (12) により求められる。
 20 ここで、 $ACC(\text{センサ}/B C)$ 、 $\omega(\text{センサ}/B C)$ は、より詳しくは、それぞれ
 加速度センサ 16、ジャイロセンサ 17 の箇所の加速度ベクトル、角速
 度ベクトルであり、その意味で、 ACC 、 ω の表記に「センサ」を付加
 している。なお、この例では加速度センサ 16、ジャイロセンサ 17 の
 箇所はほぼ同一箇所とし、センサ座標系 S C は両センサ 16, 17 につ
 25 いて同じ座標系としている。

$$ACC(\text{センサ}/B C) = R(S C \rightarrow B C) \cdot ACC(\text{センサ}/S C) \quad \dots\dots (11)$$

$$\omega(\text{センサ}/BC) = R(SC \rightarrow BC) \cdot \omega(\text{センサ}/SC) \quad \dots\dots (12)$$

ここで、変換テンソル $R(SC \rightarrow BC)$ はセンサ座標系 SC と身体座標系 BC との相対的な姿勢関係（詳しくは、センサ座標系 SC の各軸の身体座標系 BC の各軸に対する傾き角）から前記した要素座標系間変換テンソル（ $R(C_大腿部 \rightarrow C_腰部)$ 等）と同様に求められる。例えば、センサ座標系 SC の 3 軸（ XYZ 軸）が図 6 に示す如く身体座標系 BC の Y 軸（図 6 の紙面に垂直な軸）回りに角度 θ_y だけ傾いている場合には、変換テンソル $R(SC \rightarrow BC)$ は前記式（1）の右辺と同じ形の行列で表される。この場合、加速度センサ 16 およびジャイロセンサ 17 は身体座標系 BC を設けた腰部 8 に固定されているので、センサ座標系 SC の各軸の身体座標系 BC の各軸に対する傾き角は、加速度センサ 16 およびジャイロセンサ 17 の腰部 8 への取り付け時に実測されて判明しており、その傾き角を基にあらかじめ変換テンソル $R(SC \rightarrow BC)$ が求められて、演算処理装置 18 の図示しないメモリに記憶保持されている。補足すると、加速度センサ 16 やジャイロセンサ 17 を腰部 6 以外の部位（剛体リンクモデル $S1$ のいずれかの剛体要素に対応する剛体相当部）に装着してもよい。この場合には、加速度ベクトル $ACC(\text{センサ}/BC)$ および角速度ベクトル $\omega(\text{センサ}/BC)$ は、センサ座標系 SC での検出値を加速度センサ 16 やジャイロセンサ 17 を装着した剛体要素の要素座標系での値に変換した後、さらに前記変換テンソル作成手段 28 で求めた変換テンソルによって身体座標系 BC での値に変換すればよい。

身体座標系加速度算出手段 30 の演算処理では、上記の如く加速度ベクトル $ACC(\text{センサ}/BC)$ および角速度ベクトル $\omega(\text{センサ}/BC)$ を求めた後、次式（13）によって、身体座標系 BC の原点の加速度ベクトル $ACC(BCO/BC)$ を求める。「 BCO 」は身体座標系 BC の原点を表す符号である。

$$\text{ACC}(\text{BCO}/\text{BC}) = \text{ACC}(\text{センサ}/\text{BC}) + \text{U}(\text{センサ}/\text{BC}) \times \omega(\text{センサ}/\text{BC})'$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & \text{U}(\text{センサ}/\text{BC})_x & \text{U}(\text{センサ}/\text{BC})_x \\ \text{U}(\text{センサ}/\text{BC})_y & 0 & \text{U}(\text{センサ}/\text{BC})_y \\ \text{U}(\text{センサ}/\text{BC})_z & \text{U}(\text{センサ}/\text{BC})_z & 0 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \omega(\text{センサ}/\text{BC})_x^2 \\ \omega(\text{センサ}/\text{BC})_y^2 \\ \omega(\text{センサ}/\text{BC})_z^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(13)$$

注)ACC(BCO/BC)は、センサが身体座標系BCの原点に設置され、且つ、センサの軸の向きを身体座標系BCと一致させた場合のセンサ出力値と等しくなるベクトルである。

この式(13)中の、U(センサ/BC)は、身体座標系BCでの加速度センサ16およびジャイロセンサ17の位置ベクトルであり、U(センサ/BC)_x、U(センサ/BC)_y、U(センサ/BC)_zはそれぞれ、前述した本明細書でのベクトルの座標成分値の表記手法の定義にしたがって、U(センサ/BC)の身体座標系BCでの各座標成分値である。U(センサ/BC)は、加速度センサ16およびジャイロセンサ17の腰部8への取り付け時に実測されて演算処理装置18のメモリに記憶保持されている。

また、 $\omega(\text{センサ}/\text{BC})_x$ 、 $\omega(\text{センサ}/\text{BC})_y$ 、 $\omega(\text{センサ}/\text{BC})_z$ はそれぞれ先に求めた角速度ベクトル $\omega(\text{センサ}/\text{BC})$ の各座標成分値である。また、 $\omega(\text{センサ}/\text{BC})'$ は、 $\omega(\text{センサ}/\text{BC})$ の1階微分値を示しており、その値は、演算処理装置18の演算処理周期毎に前記式(12)により求める $\omega(\text{センサ}/\text{BC})$ の時系列データから算出される。補足すると、腰部要素S6内のどの部分でも角速度は同一であり、例えば腰部要素S6に固定されている身体座標系BCの原点BCOの角速度 $\omega(\text{BCO}/\text{BC})$ は、 $\omega(\text{センサ}/\text{BC})$ に等しい。

なお、加速度センサ16は重力に伴う加速度も検出するので、上記の

ように求められた加速度ベクトル $ACC(BCO/BC)$ には、重力による慣性加速度成分が含まれる。また、本実施系形態では、腰部要素 S 6 の角速度を考慮して身体座標系 BC の原点 BCO の加速度ベクトル $ACC(BCO/BC)$ を求めるようにしたが、腰部要素 S 6 の角速度やその変化率は比較的小さいので、前記式 (11) で求めた $ACC(センサ/BC)$ をそのまま身体座標系 BC の原点 BCO の加速度ベクトル $ACC(BCO/BC)$ としてもよい。

また、前記身体座標系傾斜角算出手段 31 の演算処理では、加速度センサ 16 およびジャイロセンサ 17 の検出出力から所謂カルマンフィルタによって鉛直方向（重力方向）に対する腰部要素 S 6 の傾斜角（身体座標系 BC の Z 軸の傾斜角）が算出される。この算出手法は公知であるのでここでの説明は省略する。なお、ここで算出される傾斜角は、前後方向の水平軸と左右方向の水平軸との 2 軸回りの傾斜角である。

次に、演算処理装置 18 は、全体／要素重心運動算出手段 30 の演算処理を実行する。この全体／要素重心運動算出手段 30 の演算処理では、まず、前記関節・要素重心位置算出手段 29 によって求められた各剛体要素の重心位置（身体座標系 BC での位置ベクトル）と、あらかじめ前述したように設定された各剛体要素の重量とから、次式 (14) によって、剛体リンクモデル S1 の全体重心（人間 1 の全体重心。以下、 $G_{全体}$ と表記することがある）の身体座標系 BC での位置ベクトル $U(G_{全体}/BC)$ が求められる。

$$U(G_{全体}/BC)$$

$$= \{ U(G_{胸部}/BC) \times m_{胸部}$$

$$+ U(G_{腹部}/BC) \times m_{腹部}$$

$$+ U(G_{腰部}/BC) \times m_{腰部}$$

$$+ U(G_{右大腿部}/BC) \times m_{右大腿部}$$

$$\begin{aligned}
 &+ U(G_左大腿部/BC) \times m_左大腿部 \\
 &+ U(G_右下腿部/BC) \times m_右下腿部 \\
 &+ U(G_左下腿部/BC) \times m_左下腿部 \\
 &+ U(G_右足平部/BC) \times m_右足平部 \\
 5 \quad &+ U(G_左足平部/BC) \times m_左足平部 \} / \text{全体重量}
 \end{aligned}$$

..... (14)

なお、 $m_胸部$ など、「 $m_〇〇$ 」は $〇〇$ の名称に対応する剛体要素の重量である。この式(14)の如く、全体重心の位置ベクトル $U(G_全体/BC)$ は、剛体リンクモデルS1の各剛体要素の重心の身体座標系BCでの位置ベクトルとその剛体要素の重量との積の総和を、人間1の全体重量(=全ての剛体要素の重量の総和)で除算することで求められる。

全体/要素重心運動算出手段30の演算処理では、さらに、上記のように求めた全体重心の位置ベクトル $U(G_全体/BC)$ の時系列データ(演算処理装置18の演算処理周期毎の $U(G_全体/BC)$ の時系列値)から、 $U(G_全体/BC)$ の2階微分値 $U(G_全体/BC)''$ が算出される。この2階微分値 $U(G_全体/BC)''$ は、身体座標系BCの原点BCOに対する全体重心 $G_全体$ の相対的な加速度を意味している。そして、この2階微分値 $U(G_全体/BC)''$ 、すなわち、身体座標系BCの原点BCOに対する $G_全体$ の相対加速度を、前記身体座標系加速度算出手段30で先に求めた身体座標系BCの原点BCOの加速度ベクトル $ACC(BCO/BC)$ に加算することにより、 $G_全体$ の実際の加速度ベクトル $ACC(G_全体/BC)$ が算出される。すなわち、次式(15)により、 $ACC(G_全体/BC)$ が算出される。

$$25 \quad ACC(G_全体/BC) = ACC(BCO/BC) + U(G_全体/BC)''$$

..... (15)

さらに、全体／要素重心運動算出手段 32 の演算処理では、関節・要素重心位置算出手段 29 で先に求めた各脚体部 S2 の大腿部要素 S10、下腿部要素 S12、および足平部要素 S14 のそれぞれの重心の位置ベクトル（身体座標系 BC での位置ベクトル）の時系列データ（演算処理装置 18 の演算処理周期毎の時系列値）から、それぞれの重心の位置ベクトルの 2 階微分値、すなわち、身体座標系 BC の原点 BCO に対する各剛体要素の重心の相対加速度が算出される。そして、この各剛体要素の重心の相対加速度を、前記身体座標系加速度算出手段 30 で先に求めた身体座標系 BC の原点 BCO の加速度ベクトル $ACC(BCO/BC)$ に加算することにより、各剛体要素の重心の実際の加速度ベクトルが算出される。例えば、各大腿部要素 S10 の重心 G__大腿部 (G10) の加速度ベクトル $ACC(G_大腿部/BC)$ は、前記式 (15) と同様、G__大腿部の位置ベクトル $U(G_大腿部/BC)$ の 2 階微分値 $U(G_大腿部/BC)''$ に $ACC(BCO/BC)$ を加算することで算出される。下腿部要素 S12、足平部要素 S14 についても同様である。

次に、演算処理装置 18 は、前記床反力推定手段 33 および床反力作用点推定手段 34 の算出処理を実行する。床反力推定手段 33 の演算処理では、まず、接地センサ 24, 25 の検出出力に基づき、人間 1 の運動状態が両脚体 2, 2 が接地する両脚支持状態であるか、一方の脚体 2 のみが接地する単脚支持状態であるかが判断される。すなわち、一方の脚体 2 の接地センサ 24, 25 のいずれかが接地有りを示す ON 信号を出力し、且つ、他方の脚体 2 の接地センサ 24, 25 のいずれかが接地有りを示す ON 信号を出力している場合には両脚接地状態であると判断される。また、両脚体 2, 2 のうちの一方の脚体 2 の接地センサ 24, 25 のいずれかが接地有りを示す ON 信号を出力しており、且つ、他方の脚体 2 の接地センサ 24, 25 の両者が接地有りを示す ON 信号を出

力していない場合には、単脚支持状態であると判断される。そして、床反力推定手段 33 の処理では、両脚支持状態であるか単脚支持状態であるかに応じて、各別の演算処理により各脚体 2 に作用する床反力ベクトルを推定する。

- 5 この床反力ベクトルの推定処理の基本的な考え方は、本願出願人が先に提案した特開 2003-89083 号公報等のものと同じであるが、本実施形態では、主に、その推定処理に用いる座標系等が同公報等に記載した手法と相違している。以下に図 7 および図 8 (a), (b) を参照して説明する。図 7 は矢状面で見た人間 1 の単脚支持状態を例示しており、図 8 (a), (b) はそれぞれ矢状面、前額面で見た人間 1 の両脚支持状態を例示している。なお、これらの図 7 及び図 8 では人間 1 は剛体リンクモデル状に模式化して示している。図 7 に示すように、人間 1 の運動状態が単脚支持状態であるときには、接地している脚体 2 (ここでは例えば右側脚体 2 であるとする) に作用する床反力ベクトル F_{rf} (右脚体/BC)、すなわち、接地している右側脚体 2 に作用する床反力ベクトルを身体座標系 BC の座標成分値で表したものが、全体重心 $G_{\text{全体}}$ の、身体座標系 BC での並進運動に関する運動方程式を表す次式 (16) により算出される。

$$F_{rf}(\text{右脚体/BC}) = \text{全体重量} \times \text{ACC}(G_{\text{全体}}/\text{BC}) \quad \dots\dots (16)$$

- 20 すなわち、前記全体／要素重心運動算出手段 32 で算出された $G_{\text{全体}}$ の加速度ベクトル $\text{ACC}(G_{\text{全体}}/\text{BC})$ と人間 1 の全体重量 (剛体リンクモデル S1 の全体重量) とから式 (16) により床反力ベクトル F_{rf} (右脚体/BC) が算出される。左側脚体 2 が接地している場合でも、単脚支持状態では同様に、式 (16) の右辺の演算によって、床反力ベクトル F_{rf} (左脚体/BC) が算出される。この場合、前述したように
- 25 $\text{ACC}(G_{\text{全体}}/\text{BC})$ には、重力による慣性加速度成分が含まれ、また、

床反力ベクトル F_{rf} を身体座標系 BC で表すので、重力加速度やその方向を考慮する必要はない。なお、接地していない側の脚体 2 に作用する床反力ベクトル F_{rf} は 0 である。また、図 7 では、図示の便宜上、身体座標系 BC の Z 軸を鉛直方向に記載しているが、式 (16) は身体座標系 BC の傾きにはよらない。

一方、図 8 (a), (b) に示すように、両脚支持状態であるときには、右側脚体 2 に作用する床反力ベクトル F_{rf} (右脚体/BC) と左側脚体 2 に作用する床反力ベクトル F_{rf} (左脚体/BC) とが次の 5 つの関係式 (17) ~ (21) を基に算出される。

$$F_{rf}(\text{右脚体/BC}) + F_{rf}(\text{左脚体/BC}) = \text{全体重量} \times \text{ACC}(G_全体/BC) \quad \dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned} F_{rf}(\text{右脚体/BC})_x : F_{rf}(\text{右脚体/BC})_z \\ = U(G_全体/BC)_x - U(J_右足首/BC)_x \\ : U(G_全体/BC)_z - U(J_右足首/BC)_z \end{aligned} \quad \dots\dots (18)$$

$$\begin{aligned} F_{rf}(\text{左脚体/BC})_x : F_{rf}(\text{左脚体/BC})_z \\ = U(G_全体/BC)_x - U(J_左足首/BC)_x \\ : U(G_全体/BC)_z - U(J_左足首/BC)_z \end{aligned} \quad \dots\dots (19)$$

$$\begin{aligned} F_{rf}(\text{右脚体/BC})_y : F_{rf}(\text{右脚体/BC})_z \\ = U(G_全体/BC)_y - U(J_右足首/BC)_y \\ : U(G_全体/BC)_z - U(J_右足首/BC)_z \end{aligned} \quad \dots\dots (20)$$

$$\begin{aligned} F_{rf}(\text{左脚体/BC})_y : F_{rf}(\text{左脚体/BC})_z \\ = \text{ACC}(G_全体/BC)_y - U(J_左足首/BC)_y \\ : U(G_全体/BC)_z - U(J_左足首/BC)_z \end{aligned}$$

..... (21)

ここで、これらの式 (17) ~ (21) の意味を説明すると、式 (17) は、全体重心 $G_{\text{全体}}$ の、身体座標系 BC での並進運動に関する運動方程式を表している。また、式 (18) ~ (21) は、図 8 (a), (b) に示すように、床反力ベクトル F_{rf} (右脚体/BC) および床反力ベクトル F_{rf} (左脚体/BC) がそれぞれ右側脚体 2 の足首関節 13、左側脚体 2 の足首関節 13 から全体重心 $G_{\text{全体}}$ に向かうベクトルであると仮定して、換言すれば、床反力ベクトル F_{rf} と、左側足首関節 13 から見た $G_{\text{全体}}$ の位置ベクトルとの向きが同じであると仮定して得られる幾何学的関係式である。この場合、式 (18), (19) は矢状面 (身体座標系 BC の XZ 平面) で見た関係式であり、式 (20), (21) は前額面 (身体座標系 BC の YZ 平面) で見た関係式である。なお、図 8 では、図示の便宜上、身体座標系 BC の Z 軸を鉛直方向に記載しているが、式 (17) ~ (21) は身体座標系 BC の傾きにはよらない。

また、本実施形態では、各脚体 2 の足首関節 13 は、該脚体 2 の下端部近傍の特定部としての意味を持つ。

両脚支持状態での床反力ベクトル F_{rf} (右脚体/BC), F_{rf} (左脚体/BC) を求める場合には、それらのベクトルの座標成分値を未知数として、前記式 (17) ~ (21) により構成される連立方程式を解くことで、 F_{rf} (右脚体/BC), F_{rf} (左脚体/BC) が算出される。すなわち、 F_{rf} (右脚体/BC), F_{rf} (左脚体/BC) は、人間 1 の全体重量と全体/要素重心運動算出手段 32 で求めた $ACC(G_{\text{全体}}/BC)$ および $U(G_{\text{全体}}/BC)$ と関節・要素重心位置算出手段 29 で求めた $U(J_{\text{右足首}}/BC)$ および $U(J_{\text{左足首}}/BC)$ とから算出される。このように、本実施形態では、両脚支持状態での床反力ベクトル F_{rf} (右脚体/BC), F_{rf} (左脚体/BC) は、身体座標系 BC で記述される前記関係式 (17) ~

(21)に基づいて算出される。

なお、 F_{rf} (右脚体/BC), F_{lf} (左脚体/BC)のZ軸成分は、矢状面に関する式(18), (19)、あるいは前額面に関する式(20), (21)のいずれを用いても求めることが可能である。

- 5 床反力作用点推定手段34の演算処理では、まず、前記身体座標系傾斜角算出手段31で算出された腰部要素S6の鉛直方向に対する傾斜角を基に、身体座標系BCから絶対座標系ICへの変換テンソル $R(BC \rightarrow IC)$ が作成される。ここで、絶対座標系ICは、鉛直方向をZ軸とする直交座標系で、前記基準姿勢状態において身体座標系BCと各座標軸の
- 10 向きが同一となる座標系である。なお、絶対座標系ICから身体座標系BCへの変換テンソル $R(IC \rightarrow BC)$ は変換テンソル $R(BC \rightarrow IC)$ の転置 $R(BC \rightarrow IC)^T$ である。

- 次いで、上記変換テンソル $R(BC \rightarrow IC)$ を用いて、前記全体／要素重心運動算出手段32で先に求めた全体重心 $G_{全体}$ の位置ベクトル $U(G_{全体}/BC)$ と、関節・要素重心位置算出手段29で先に求めた各脚
- 15 体部S2の足首関節J13およびMP関節J14aのそれぞれの位置ベクトル $U(J_{足首}/BC)$, $U(J_{MP}/BC)$ とにそれぞれ上記変換テンソル $R(BC \rightarrow IC)$ を乗算することにより、全体重心 $G_{全体}$ 、各足首関節J13およびMP関節J14aの絶対座標系ICで見た位置ベクトル U
- 20 ($G_{全体}/IC$), $U(J_{足首}/IC)$, $U(J_{MP}/IC)$ が算出される。なお、これらの位置ベクトル $U(G_{全体}/IC)$, $U(J_{足首}/IC)$, $U(J_{MP}/IC)$ は、身体座標系BCと同じ原点を有する絶対座標系ICでの位置ベクトルである。また、このとき、接地センサ24, 25の検出出力により接地無しと判断される脚体2に関しては、位置ベクトル $U(J_{足首}$
- 25 $/IC)$, $U(J_{MP}/IC)$ を算出する必要はない。

次いで、接地センサ24, 25の検出出力により接地有りと判断され

る各脚体 2 毎に、位置ベクトル $U(G_全体/IC)$, $U(J_足首/IC)$, $U(J_MP/IC)$ の X 軸方向成分 $U(G_全体/IC)_x$, $U(J_足首/IC)_x$, $U(J_MP/IC)_x$ の大小関係に応じて、換言すれば、全体重心 $G_全体$ 、足首関節 13 および MP 関節 14a の前後方向での相対的な水平位置関係に応じて、床反力作用点の位置ベクトル（絶対座標系 IC での位置ベクトル） $U(COP/IC)$ の X 軸成分および Y 軸成分が決定される。この決定手法を図 9 (a) ~ (c) および図 10 を参照してさらに詳説する。なお、以下の説明では、左側脚体 2 が接地しているとする。図 9 (a) ~ (c) は矢状面で見た人間 1 の左脚体 2 が接地している状態（これらの図では単脚支持状態）を例示しており、図 10 は図 9 (b) の状態での接地側の足平部 14 を平面視で見た図を示している。なお、図 9 及び図 10 では人間 1 は剛体リンクモデル状に模式化して示している。

図 9 (a) に示すように、全体重心 $G_全体$ が接地している左側脚体 2 の MP 関節 14a よりも前方に存在する場合、すなわち、 $U(G_全体/IC)_x > U(J_左MP/IC)_x$ である場合には、該左側脚体 2 の足平部 14 は、主にそのつま先側部分で踏ん張って接地している。この場合には、床反力作用点 COP は、その足平部 14 の MP 関節 14a のほぼ直下の位置に存在する。そこで、この場合には、床反力作用点 COP の位置ベクトル $U(左COP/IC)$ の X, Y 軸成分はそれぞれ MP 関節 14a の位置ベクトル $U(J_左MP/IC)$ の X, Y 軸成分に等しいとする。すなわち、 $U(左COP/IC)_x = U(J_左MP/IC)_x$ 、 $U(左COP/IC)_y = U(J_左MP/IC)_y$ とする。

また、図 9 (c) に示す如く、全体重心 $G_全体$ が接地している左側脚体 2 の足首関節 13 よりも後方に存在する場合、すなわち、 $U(G_全体/IC)_x < U(J_左足首/IC)_x$ である場合には、該左側脚体 2 の足平

部 1 4 は、主にその踵側部分で踏ん張って接地している。この場合には、床反力作用点 COP は、その左側脚体 2 の足首関節 1 3 のほぼ直下の位置に存在する。そこで、この場合には、床反力作用点 COP の位置ベクトル $U(\text{左 COP/IC})$ の X, Y 軸成分はそれぞれ足首関節 1 3 の位置ベクトル $U(\text{J_左足首/IC})$ の X, Y 軸成分に等しいとする。すなわち、 $U(\text{左 COP/IC})_x = U(\text{J_左足首/IC})_x$ 、 $U(\text{左 COP/IC})_y = U(\text{J_左足首/IC})_y$ とする。

また、図 9 (b) に示すように、全体重心 $G_全体$ が前後方向で左側脚体 2 の足首関節 1 3 と MP 関節 1 4 a との間に存在する場合、すなわち、 $U(\text{J_左 MP/IC})_x \leq U(G_全体/IC)_x \leq U(\text{J_左足首/IC})_x$ である場合には、床反力作用点 COP は、図示の矢状面上では、全体重心 $G_全体$ のほぼ真下に存在する。そこで、この場合には、床反力作用点 COP の位置ベクトル $U(\text{左 COP/IC})$ の X 軸成分は、全体重心 $G_全体$ の X 軸成分に等しいとする。すなわち、 $U(\text{左右 COP/IC})_x = U(G_全体/IC)_x$ とする。そして、床反力作用点 COP は、接地している左側脚体 2 の足平部 1 4 と床面との接触面（この場合、該接触面は足平部 1 4 の底面のほぼ全面）に存在しており、その位置は、概ね、足首関節 1 3 の中心点と MP 関節 1 4 a の中心点とを結ぶ線分を床面に投影した線分上に存在すると考えられる。そこで、床反力作用点 COP の位置ベクトル $U(\text{右 COP/IC})$ の Y 軸成分は、図 10 に示す如く、左側脚体 2 に関する足平部要素 S 1 4 の軸心上（足首関節 1 3 の中心点と MP 関節 1 4 a の中心点とを結ぶ線分上）で、全体重心 $G_全体$ と X 軸成分（絶対座標系 IC での X 軸成分）の値が同じになるような点 P の Y 軸成分と等しいとする。このような位置ベクトル $U(\text{右 COP/IC})$ の Y 軸成分の値は、次式 (22) に比例関係式に基づいて求められる。

$$U(\text{左 COP/IC})_x - U(\text{J_左足首/IC})_x$$

$$\begin{aligned} & : U(J_左MP/IC)x - U(J_左足首/IC)x \\ & = U(左COP/IC)y - U(J_左足首/IC)y \end{aligned}$$

$$: U(J_左MP/IC)y - U(J_左足首/IC)y$$

..... (22)

- 5 また、床反力作用点の位置ベクトル $U(左COP/IC)$ の Z 軸成分は、左側脚体 2 の足首関節 13（足首要素 J13）からあらかじめ定めた所定値 $H0 (>0)$ だけ鉛直方向下方に離れた点の Z 軸成分に等しいとする。すなわち、 $U(左COP/IC)z = U(J_左足首/IC)z - H0$ とする。ここで、所定値 $H0$ は、前記基準姿勢状態（より正確には足平部 14 の底面
- 10 のほぼ全体を水平な床面上に接触させた状態）における床面から足首関節 13 の中心までの鉛直方向距離であり、あらかじめ実測されて演算処理装置 18 のメモリに記憶保持されている。所定値 $H0$ は左右の各脚体 2 毎に各別に実測してもよいが、いずれかの一方の脚体 2 について実測した値を左右の両脚体 2 で共通に使用してもよい。
- 15 本実施形態では、以上の如く、左側脚体 2 が接地している場合に該左側脚体に作用する床反力ベクトル Frf の床反力作用点の位置ベクトル $U(左COP/IC)$ が求められる。右側脚体 2 が接地している場合についても同様である。この場合、両脚支持状態では、各脚体 2 のそれぞれについて上記の如く床反力作用点の位置ベクトルが求められる。
- 20 なお、本実施形態では、床反力作用点の位置ベクトル $U(COP/IC)$ の Z 軸成分を求めるために用いる前記所定値 $H0$ を一定値としたが、接地センサ 24, 25 により、足平部 14 のつま先側のみが接地していること、すなわち、接地センサ 25 のみが接地有りを示す ON 信号を出力している場合には、上記所定値 $H0$ の代わりに、その接地している脚体 2
- 25 のついて、足首関節 13 および MP 関節 14a のそれぞれの位置ベクトル $U(J_足首/IC)$, $U(J_MP/IC)$ の Z 軸成分の差 ($U(J_足首/IC)$)

$z - U(J_MP/IC)z$), すなわち、足首関節 13 と MP 関節 14 a との鉛直方向距離を使用するようにしてもよい。このようにすると、 $U(COP/IC)$ の精度を高めることができる。

床反力作用点推定手段 34 の演算処理では、最後に、上記の如く接地している各脚体 2 について求めた床反力作用点の位置ベクトル $U(COP/IC)$ に、先に求めた変換テンソル $R(BC \rightarrow IC)$ の転置である逆変換テンソル $R(IC \rightarrow BC)$ を乗算することにより、床反力作用点の位置ベクトルの身体座標系 BC での値 $U(COP/BC)$ が求められる。

次に、演算処理装置 18 は、関節モーメント推定手段 35 による演算処理を実行する。この関節モーメント推定手段 35 の演算処理の概略を説明すると、各脚体部 S2 の足平部要素 S14、下腿部要素 S12、大腿部要素 S10 のそれぞれの並進運動および回転運動に関する運動方程式に基づく逆動力学モデルの演算によって、足平部要素 S14、下腿部要素 S12、および大腿部要素 S10 のそれぞれの腰部要素 S6 側の端点の関節要素 J__足首、J__膝、J__股の関節モーメントが順番に算出される。

以下、具体的に説明すると、足平部要素 S14、下腿部要素 S12、大腿部要素 S10 のそれぞれの並進運動の運動方程式は次の式 (23) ~ (25) により与えられる。なお、以下の説明において、一般的に、足平部要素 S14、下腿部要素 S12、および大腿部要素 S10 のそれぞれの剛体要素の両端のうち、腰部要素 S6 に近い側の一端部を「P__〇〇」、遠い側の他端部「D__〇〇」(〇〇は剛体要素を表す名称) というように表記することがある。例えば下腿部要素 S12 の膝関節 J__膝 (J11) 側の端部を「P__下腿部」、足首関節 J__足首 (J13) 側の端部を「D__下腿部」というように表記する。なお、「近い側の一端部」というのは、腰部要素 S6 との距離が近いという意味ではなく、該

一端部と腰部要素 S 6 との間に介在する剛体要素がより少ないということ
を意味している。同様に、「遠い側の他端部」というのは、該他端部
と腰部要素 S 6 との間に介在する剛体要素がより多いということ
を意味している。

$$\begin{aligned} 5 \quad F(P_足平部/BC) &= m_足平部 \times ACC(G_足平部/BC) \\ &\quad - F(D_足平部/BC) \\ &\quad \dots\dots (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(P_下腿部/BC) &= m_下腿部 \times ACC(G_下腿部/BC) \\ &\quad - F(D_下腿部/BC) \end{aligned}$$

$$10 \quad \dots\dots (24)$$

$$\begin{aligned} F(P_大腿部/BC) &= m_大腿部 \times ACC(G_大腿部/BC) \\ &\quad - F(D_大腿部/BC) \end{aligned}$$

$$\dots\dots (25)$$

ここで、上記各式 (23) ~ (25) 中に現れる 2 つの $F(P_〇〇/BC)$ 、 $F(D_〇〇/BC)$ は、その 〇〇 で表される名称の剛体要素の両
15 端が、それぞれに接触する物体から受ける反力 (身体座標系 BC で表し
た並進力ベクトル) を意味している。この場合、 $F(D_足平部/BC)$ は、
前記床反力推定手段 33 で求めた床反力ベクトル $F_{rf}(\text{脚体}/BC)$ に等
しい。また、 $F(D_下腿部/BC) = -F(P_足平部/BC)$ 、 $F(D_大腿$
20 $部/BC) = -F(P_下腿部/BC)$ である。

従って、床反力推定手段 33 で求めた床反力ベクトル $F_{rf}(\text{脚体}/BC)$ と、前記全体／要素重運動算出手段 32 で求めた足平部要素 S 1
4 の重心の加速度ベクトル $ACC(G_足平部/BC)$ と、足平部要素 S 1 4
の重量 $m_足平部$ とから式 (23) の右辺の演算により、 $F(P_足平$
25 $部/BC)$ 、すなわち、足首関節 J 足首に作用する並進力が求められる。
また、その求めた $F(P_足平部/BC)$ ($= -F(D_下腿部/BC)$) と全体

／要素重運動算出手段 32 で求めた下腿部要素 S 12 の重心の加速度ベクトル $ACC(G_下腿部/BC)$ と下腿部要素 S 12 の重量 $m_下腿部$ とから式 (24) の右辺の演算により $F(P_下腿部/BC)$ 、すなわち、膝関節 J 膝に作用する並進力が求められる。同様に、その求めた $F(P_下腿部/BC)$ ($= F(D_大腿部/BC)$) を用いて、式 (25) の右辺の演算により $F(P_大腿部/BC)$ 、すなわち、股関節 J 股に作用する並進力が求められる。このように、関節要素 J 足首、J 膝、J 股に作用する反力ベクトル (並進力ベクトル) が上記 (23) ~ (25) の運動方程式に基づいて順番に算出される。

- 10 次に、足平部要素 S 14、下腿部要素 S 12、大腿部要素 S 10 のそれぞれの回転運動 (それぞれの重心回りの回転運動) の運動方程式は次の式 (26) ~ (28) により与えられる。

$$M(P_足平部/C_足平部)$$

$$= I_足平部 \times \omega(足平部/C_足平部)'$$

$$\begin{aligned} 15 \quad & + \omega(足平部/C_足平部) \times (I_足平部 \times \omega(足平部/C_足平部)) \\ & - (U(COP/C_足平部) - U(G_足平部/C_足平部)) \\ & \quad \times (R(BC \rightarrow C_足平部) \times F(D_足平部/BC)) \\ & - (U(P_足平部/C_足平部) - U(G_足平部/C_足平部)) \\ & \quad \times (R(BC \rightarrow C_足平部) \times F(P_足平部/BC)) \\ 20 \quad & - R(BC \rightarrow C_足平部) \times M(D_足平部/BC) \end{aligned}$$

..... (26)

$$M(P_下腿部/C_下腿部)$$

$$= I_下腿部 \times \omega(下腿部/C_下腿部)'$$

$$\begin{aligned} 25 \quad & + \omega(下腿部/C_下腿部) \times (I_下腿部 \times \omega(下腿部/C_下腿部)) \\ & - (-U(G_下腿部/C_下腿部)) \\ & \quad \times (R(BC \rightarrow C_下腿部) \times F(D_下腿部/BC)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - (U(P_下腿部/C_下腿部) - U(G_下腿部/C_下腿部)) \\
 & \quad \times (R(BC \rightarrow C_下腿部) \times F(P_下腿部/BC)) \\
 & - R(BC \rightarrow C_下腿部) \times M(D_下腿部/BC)
 \end{aligned}$$

..... (27)

$$\begin{aligned}
 5 \quad & M(P_大腿部/C_大腿部) \\
 & = I_大腿部 \times \omega(大腿部/C_大腿部)' \\
 & \quad + \omega(大腿部/C_大腿部) \times (I_大腿部 \times \omega(大腿部/C_大腿部)) \\
 & \quad - (-U(G_大腿部/C_大腿部)) \\
 & \quad \times (R(BC \rightarrow C_大腿部) \times F(D_大腿部/BC))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 10 \quad & - (U(P_大腿部/C_大腿部) - U(G_大腿部/C_大腿部)) \\
 & \quad \times (R(BC \rightarrow C_大腿部) \times F(P_大腿部/BC)) \\
 & - R(BC \rightarrow C_大腿部) \times M(D_大腿部/BC)
 \end{aligned}$$

..... (28)

ここで、上記各式 (26) ~ (28) 中にそれぞれ現れる 2 つの F
 15 (P__〇〇/BC)、F (D__〇〇/BC) は、その〇〇で表される名称の剛
 体要素の各端が、それぞれに接触する物体から受ける反力モーメント
 (身体座標系 BC で表したモーメントベクトル) を意味している。この
 場合、式 (26) の M(D__足平部/BC) は 0 である。また、M(D__下腿
 部/BC) = -R(C__足平部 → BC) × M(P__足平部/C__足平部)、M(D__
 20 大腿部/BC) = -R(C__下腿部 → BC) × M(P__下腿部/C__下腿部) であ
 る。また、I__足平部、I__下腿部、I__大腿部は、それぞれ足平部要
 素 S 14、下腿部要素 S 12、大腿部要素 S 10 のそれぞれの重心回り
 の慣性モーメントであり、ω(足平部/C__足平部)、ω(下腿部/C__下腿
 部)、ω(大腿部/C__大腿部) は、それぞれ、足平部要素 S 14、下腿部
 25 要素 S 12、大腿部要素 S 10 のそれぞれの重心回りの角速度を意味し
 ている。この場合、一般に、慣性モーメント I__足平部、I__下腿部、

I __大腿部は、十分に小さい値（0に近い値）であるので、本実施形態では、I __足平部、I __下腿部、I __大腿部はいずれも0に近似する。

従って、前記式（26）～（28）は、近似的に次の式（29）～（31）に書き換えられる。なお、式（29）～（31）では、M(D __足平部/BC)=0、M(D __下腿部/BC)= $-R(C_足平部 \rightarrow BC) \times M(P_足平部/C_足平部)$ 、M(D __大腿部/BC)= $-R(C_下腿部 \rightarrow BC) \times M(P_下腿部/C_下腿部)$ であることを考慮している。

$$M(P_足平部/C_足平部)$$

$$= - (U(COP/C_足平部) - U(G_足平部/C_足平部))$$

$$\times (R(BC \rightarrow C_足平部) \times F(D_足平部/BC))$$

$$- (U(P_足平部/C_足平部) - U(G_足平部/C_足平部))$$

$$\times (R(BC \rightarrow C_足平部) \times F(P_足平部/BC))$$

……（29）

$$M(P_下腿部/C_下腿部)$$

$$= - (-U(G_下腿部/C_下腿部))$$

$$\times (R(BC \rightarrow C_下腿部) \times F(D_下腿部/BC))$$

$$- (U(P_下腿部/C_下腿部) - U(G_下腿部/C_下腿部))$$

$$\times (R(BC \rightarrow C_下腿部) \times F(P_下腿部/BC))$$

$$- R(BC \rightarrow C_下腿部)$$

$$\times (-R(C_足平部 \rightarrow BC) \times M(P_足平部/C_足平部))$$

……（30）

$$M(P_大腿部/C_大腿部)$$

$$= - (-U(G_大腿部/C_大腿部))$$

$$\times (R(BC \rightarrow C_大腿部) \times F(D_大腿部/BC))$$

$$- (U(P_大腿部/C_大腿部) - U(G_大腿部/C_大腿部))$$

$$\times (R(BC \rightarrow C_大腿部) \times F(P_大腿部/BC))$$

— $R(BC \rightarrow C_大腿部)$

$\times (-R(C_下腿部 \rightarrow BC) \times M(P_下腿部/C_下腿部))$

…… (31)

そして、本実施形態では、式 (29) の右辺の演算により、 $M(P_足平部/C_足平部)$ 、すなわち、足首関節 13 に作用する関節モーメント $M(P_足平部/C_足平部)$ (足平部座標系 $C_足平部$ で表したモーメントベクトル) が求められる。この場合、式 (29) の右辺の $U(COP/C_足平部)$ は、前記床反力作用点推定手段 34 で先に求めた床反力作用点の位置ベクトル $U(COP/BC)$ に、前記変換テンソル作成手段 28 で求めた変換テンソル $R(C_足平部 \rightarrow BC)$ の逆変換テンソル $R(BC \rightarrow C_足平部) = R(C_足平部 \rightarrow BC)^T$ を乗算することにより求められる。また、 $U(G_足平部/C_足平部)$ は、あらかじめ設定されたものであり、 $U(P_足平部/C_足平部)$ は、足平部要素 S14 のあらかじめ定められた長さ $L14$ により定まる、足平部座標系 $C_足平部$ における足首関節 J13 の位置ベクトル $(0, 0, L14)^T$ である。また、 $F(D_足平部/BC)$ は床反力推定手段 31 で先に求めた床反力ベクトル F_{rf} (脚体/BC) の値である。さらに、 $F(P_足平部/BC)$ は、前記式 (23) により前述の通り求められる。従って、変換テンソル作成手段 28 で作成された変換テンソル $R(C_足平部 \rightarrow BC)$ と、床反力作用点推定手段 34 で求めた床反力作用点の位置ベクトル $U(COP/BC)$ と、床反力推定手段 33 で求めた床反力ベクトル F_{rf} (脚体/BC) と、前記式 (23) により求めた反力ベクトル $F(P_足平部/BC)$ とを用いて式 (29) の右辺の演算により、 $M(P_足平部/C_足平部)$ 、すなわち、足首関節 13 に作用する関節モーメント (足平部座標系 $C_足平部$ で表したモーメントベクトル) が求められる。なお、接地していない脚体 2 については、その床反力作用点の位置ベクトル $U(COP/C_足平部)$ は不

定であるが、 $F(D_足平部/BC)=0$ であるので、式(29)の第1項の値は $U(COP/C_足平部)$ の値によらずに0になる。

また、式(30)の右辺の演算により、 $M(P_下腿部/C_下腿部)$ 、すなわち、膝関節11に作用する関節モーメント(下腿部座標系 $C_下腿部$ で表したモーメントベクトル)が求められる。この場合、式(30)の右辺の $U(G_下腿部/C_下腿部)$ は、あらかじめ設定されたものであり、 $U(P_下腿部/C_下腿部)$ は、下腿部要素S12のあらかじめ定められた長さ $L12$ により定まる、下腿部座標系 $C_下腿部$ ($C12$)における膝関節J11の位置ベクトル $(0, 0, L12)^T$ である。また、 $R(BC \rightarrow C_下腿部)$ は、変換テンソル作成手段28で作成した変換テンソル $R(C_下腿部 \rightarrow BC)$ の逆変換テンソル $R(C_下腿部 \rightarrow BC)^T$ である。また、 $F(D_下腿部/BC)$ は、前記式(23)により求められる $F(P_足平部/BC)$ の符号を反転させたものであり、 $F(P_下腿部/BC)$ は、前記式(24)により求められるものである。さらに、 $M(P_足平部/C_足平部)$ は、前記式(29)により求められる。従って、変換テンソル作成手段28で作成された変換テンソル $R(C_下腿部 \rightarrow BC)$ 、 $R(C_足平部 \rightarrow BC)$ と、前記式(23)、(24)によりそれぞれ先に求めた反力ベクトル $F(P_足平部/BC)$ 、 $F(P_下腿部/BC)$ と、あらかじめ設定された下腿部要素S12の重心の位置ベクトル $U(G_下腿部/C_下腿部)$ と、下腿部要素S12の長さ $L12$ と、前記式(29)により先に求めたモーメント $M(P_足平部/C_足平部)$ とを用いて式(30)の右辺の演算により、 $M(P_下腿部/C_下腿部)$ 、すなわち、膝関節11に作用する関節モーメント(下腿部座標系 $C_下腿部$ で表したモーメントベクトル)が求められる。

同様に、式(31)の右辺の演算により、 $M(P_大腿部/C_大腿部)$ 、すなわち、股関節9に作用する関節モーメント(大腿部座標系 C

大腿部で表したモーメントベクトル) が求められる。この場合、式
 (31) の右辺の $U(G_大腿部/C_大腿部)$ は、あらかじめ設定さ
 れたものであり、 $U(P_大腿部/C_大腿部)$ は、大腿部要素 S10 の
 あらかじめ定められた長さ $L10$ により定まる、大腿部座標系 $C_大腿$
 5 部における股関節 J9 の位置ベクトル $(0, 0, L10)^T$ である。また、
 $R(BC \rightarrow C_大腿部)$ は、変換テンソル作成手段 28 で作成した変換テ
 ンソル $R(C_大腿部 \rightarrow BC)$ の逆変換テンソル $R(C_大腿部 \rightarrow BC)^T$ であ
 る。また、 $F(D_大腿部/BC)$ は、前記式 (24) により求められる F
 $(P_下腿部/BC)$ の符号を反転させたものであり、 $F(P_大腿部/BC)$ は、
 10 前記式 (25) により求められるものである。さらに、 $M(P_下腿部/$
 $C_下腿部)$ は、前記式 (30) により求められる。従って、変換テン
 ソル作成手段 28 で作成された変換テンソル $R(C_大腿部 \rightarrow BC)$ 、 R
 $(C_下腿部 \rightarrow BC)$ と、前記式 (24)、(25) によりそれぞれ先に求
 めた反力ベクトル $F(P_下腿部/BC)$ 、 $F(P_大腿部/BC)$ と、あらかじ
 15 め設定された大腿部要素 S10 の重心の位置ベクトル $U(G_大腿部/C$
 $_大腿部)$ と、大腿部要素 S10 の長さ $L10$ と、前記式 (30) に
 より先に求めたモーメント $M(P_下腿部/C_下腿部)$ とを用いて式 (3
 1) の右辺の演算により、 $M(P_大腿部/C_大腿部)$ 、すなわち、股
 関節 9 に作用する関節モーメント (大腿部座標系 $C_大腿部$ で表したモー
 20 ーメントベクトル) が求められる。

以上のように、関節モーメント推定手段 35 の演算処理では、各脚体
 2 の足首関節 13、膝関節 11、および股関節 9 の関節モーメント M
 $(P_足平部/C_足平部)$ 、 $M(P_下腿部/C_下腿部)$ 、 $M(P_大腿部/$
 $C_大腿部)$ が足首関節 13 側から順番に算出される。なお、このよう
 25 に求められた関節モーメントは、例えば人間 1 の歩行を補助する装置
 (足首関節 13 や、膝関節 11、股関節 9 に補助トルクを付与可能な電

動モータを含む装置)の制御に用いられる。

- 以上説明した実施形態では、身体座標系BCを基本的な座標系として用いて各種の演算処理が実行される。そして、身体座標系BCあるいは腰部6の鉛直方向に対する傾斜角を考慮して演算処理を行うのは、床反力作用点推定手段32の演算処理だけである。このため、鉛直方向に対する腰部6等の傾斜角を使用する演算処理を従来に比して大幅に少なくすることができる。その結果、傾斜角を高い精度で把握することが困難な場合であっても、誤差の蓄積を最小限に留め、関節モーメントの推定精度を高めることができる。さらに、傾斜角を用いない床反力作用点推定手段を用いれば、関節モーメント推定システムに3次元姿勢センサなどが不要となり、システムの小型化、簡略化が可能となる。

また、本実施形態では、演算処理装置18の各手段の処理を3次元で行っているため推定する関節モーメントの精度を高めることができる。

15 産業上の利用可能性

以上のように本発明は、2足歩行移動体の脚体の関節モーメントを適切に推定できるので、人間の歩行補助を行なう装置等に有効に活用することができる。

請 求 の 範 囲

1. 2足歩行移動体を、複数の剛体要素が少なくとも該2足歩行移動体の各脚体の股関節及び膝関節に対応する関節要素を含む複数の関節要素で連結された連結体として表現する剛体リンクモデルを用い、該2足歩行移動体の各脚体の少なくとも1つの関節に作用する関節モーメントを推定する方法であって、

前記剛体リンクモデルの各関節要素に対応する前記2足歩行移動体の各関節の変位量を逐次把握する第1ステップと、前記剛体リンクモデルの所定の1つの剛体要素に固定された座標系としてあらかじめ設定された身体座標系の原点の加速度ベクトルの該身体座標系での値を少なくとも前記2足歩行移動体に装着した加速度センサの出力を用いて逐次把握する第2ステップと、前記2足歩行移動体の各脚体に作用する床反力ベクトルの前記身体座標系での値を逐次把握する第3ステップと、前記床反力ベクトルの作用点の位置ベクトルの前記身体座標系での値を逐次把握する第4ステップと、前記第1乃至第4ステップで把握した2足歩行移動体の各関節の変位量と前記身体座標系の原点の加速度ベクトルの値と前記床反力ベクトルの値とその作用点の位置ベクトルの値とを用いて、前記剛体リンクモデルの各剛体要素の運動と該剛体要素に作用する並進力およびモーメントとの関係を前記身体座標系を用いて表す逆動力学モデルに基づいて前記2足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用する関節モーメントを逐次推定する第5ステップとを備えたことを特徴とする2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

2. 前記加速度センサは、前記身体座標系が固定された剛体要素に対応する2足歩行移動体の剛体相当部に装着されていることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

3. 前記身体座標系が固定された剛体要素は、前記2足歩行移動体の一

対の股関節に対応する一対の関節要素を連結する剛体要素であることを特徴とする請求の範囲第2項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

4. 前記2足歩行移動体の全体重心の位置ベクトルの前記身体座標系での値を前記第1ステップで把握した2足歩行移動体の各関節の変位量と前記剛体リンクモデルとを用いて逐次求める第6ステップと、その全体重心の位置ベクトルの値の時系列データおよび前記第2ステップで把握した身体座標系の原点の加速度ベクトルの値から該全体重心の加速度ベクトルの身体座標系での値を逐次把握する第7ステップと、前記2足歩行移動体の運動状態が一対の脚体のうちの一方の脚体のみが接地している単脚支持状態であるか、両脚体が接地している両脚支持状態であるかを逐次判断する第8ステップとを備え、

前記第3ステップは、2足歩行移動体の運動状態が前記単脚支持状態であるときには、前記第7ステップで求めた前記全体重心の加速度ベクトルの値と2足歩行移動体の全体重量と接地している脚体に作用する床反力ベクトルとにより表される該2足歩行移動体の全体重心の運動方程式に基づいて該床反力ベクトルの身体座標系での値を推定し、2足歩行移動体の運動状態が前記両脚支持状態であるときには、前記第7ステップで求めた前記全体重心の加速度ベクトルの値と2足歩行移動体の全体重量と両脚体のそれぞれに作用する床反力ベクトルとにより表される該2足歩行移動体の全体重心の運動方程式と、各脚体に作用する床反力ベクトルが該脚体の下端部近傍にあらかじめ定めた特定部から2足歩行移動体の全体重心に向かって作用するベクトルであると仮定して定まる、2足歩行移動体の全体重心に対する該脚体の特定部の相対位置と該脚体に作用する床反力ベクトルとの間の関係式とに基づいて両脚体のそれぞれに作用する床反力ベクトルの身体座標系での値を把握することを特徴

とする請求の範囲第1項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

5. 前記身体座標系が固定された剛体要素に対応する2足歩行移動体の剛体相当部の鉛直方向に対する傾斜角を逐次把握する第9ステップと、

- 5 2足歩行移動体の各脚体毎に該脚体が接地しているか否かを判断する第10ステップと、前記第1ステップで把握した2足歩行移動体の各関節の変位置と前記剛体リンクモデルとを用いて、少なくとも2足歩行移動体の全体重心の位置ベクトルの前記身体座標系での値と接地している各脚体の足首関節の位置ベクトルの前記身体座標系での値と該脚体の足平部の中足趾節関節の位置ベクトルの前記身体座標系での値とを把握する第11ステップと、その把握した前記全体重心、接地している各脚体の足首関節および該脚体の足平部の中足趾節関節のそれぞれの位置ベクトルの値と前記第9ステップで把握した傾斜角とに基づいて少なくとも該全体重心、接地している各脚体の足首関節および該脚体の足平部の中足趾節関節の位置関係と該脚体の足首関節の鉛直方向位置とを把握する第12ステップと、その把握した全体重心、接地している各脚体の足首関節および該脚体の足平部の中足趾節関節の位置関係に基づき該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置を推定すると共に該脚体の足首関節の鉛直方向位置に基づき該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置を推定する第13ステップとを備え、前記第4ステップは、該第13ステップで推定された床反力ベクトルの作用点の水平面内位置および鉛直方向位置と前記第9ステップで把握された傾斜角とに基づき前記身体座標系での床反力ベクトルの作用点の位置ベクトルの値を把握することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

6. 前記第3ステップおよび第4ステップでそれぞれ把握する床反力ベ

クトルの値およびその作用点の位置ベクトルの値は3次元の値であり、前記第13ステップは、前記全体重心が接地している脚体の足首関節に対して2足歩行移動体の前後方向で後側に存在する場合には、該脚体の足首関節の水平面内位置を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置として推定し、前記全体重心が接地している脚体の足平部の中足趾節関節に対して2足歩行移動体の前後方向で前側に存在する場合には、該脚体の足平部の中足趾節関節の水平面内位置を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置として推定し、前記全体重心が接地している脚体の足首関節に対して2足歩行移動体の前後方向で前側に存在し、且つ該脚体の足平部の中足趾節関節に対して後側に存在する場合には、該脚体の足首関節と中足趾節関節とを結ぶ線分上で前記全体重心と前後方向の位置が同一となる点の水平面内位置を該脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の水平面内位置として推定することを特徴とする請求の範囲第5項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

7. 前記第13ステップは、接地している脚体に作用する床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置を、前記第12ステップで把握された脚体の足首関節の鉛直方向位置からあらかじめ定めた所定値だけ鉛直方向下方に離れた位置として推定することを特徴とする請求の範囲第5項または第6項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

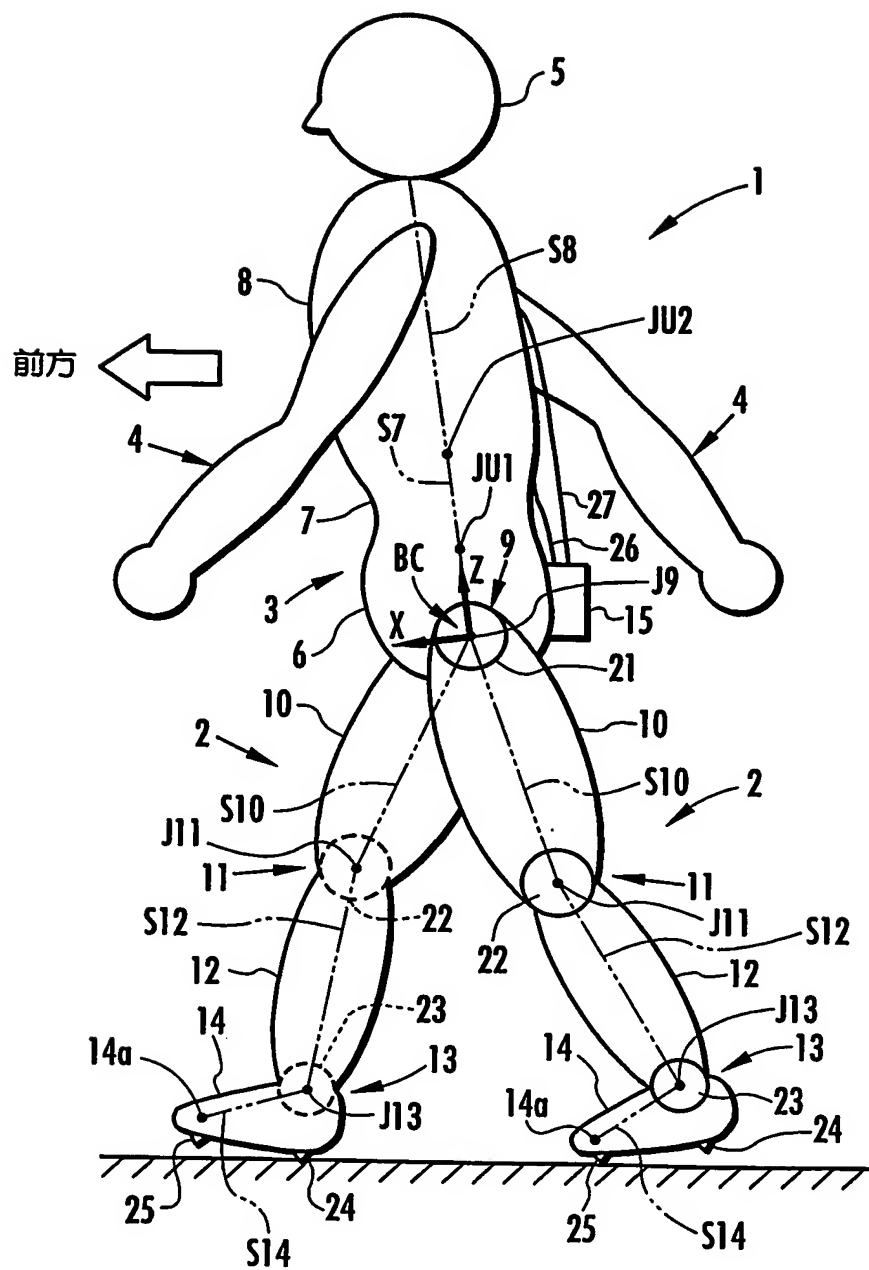
8. 前記第10ステップでは、接地していると判断した脚体について、さらに該脚体の足平部のつま先側部分および踵側部分のそれぞれの接地の有無を判断し、前記第12ステップでは、前記接地している脚体の足首関節の鉛直方向位置に加えて該脚体の足平部の中足趾節関節の鉛直方向位置を把握し、前記第13ステップでは、前記第10ステップで足平部のつま先側部分および踵側部分のうちのつま先側部分のみが接地して

いると判断されたときには、前記所定値の代りに、前記第12ステップで把握した前記足首関節の鉛直方向位置と中足趾節関節の鉛直方向位置とから求められる該足首関節と中足趾節関節との鉛直方向の距離を用いて前記床反力ベクトルの作用点の鉛直方向位置を推定することを特徴とする請求の範囲第7項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

9. 前記第3ステップおよび第4ステップでそれぞれ把握する床反力ベクトルの値およびその作用点の位置ベクトルの値は3次元の値であることを特徴とする請求の範囲第1項、第4項および第5項のいずれか1項に記載の2足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

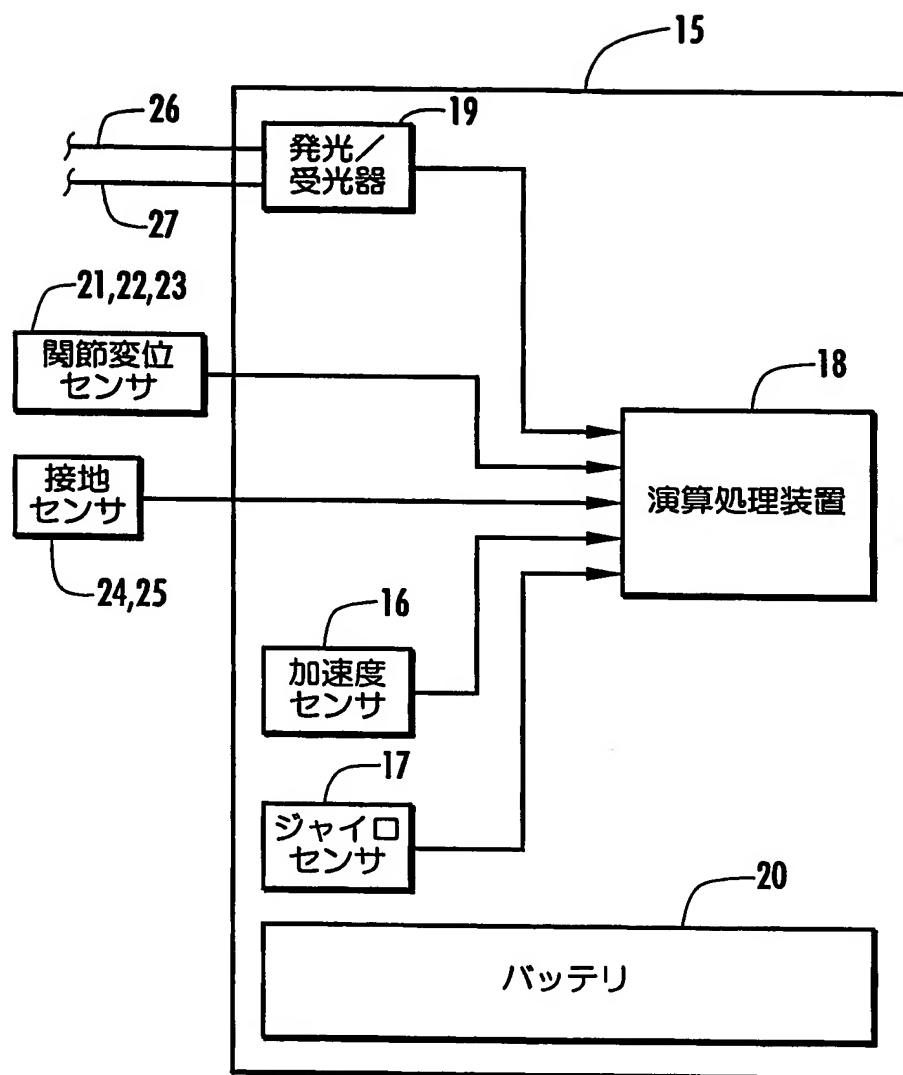
1/10

FIG.1



2/10

FIG.2



3/10

FIG.3

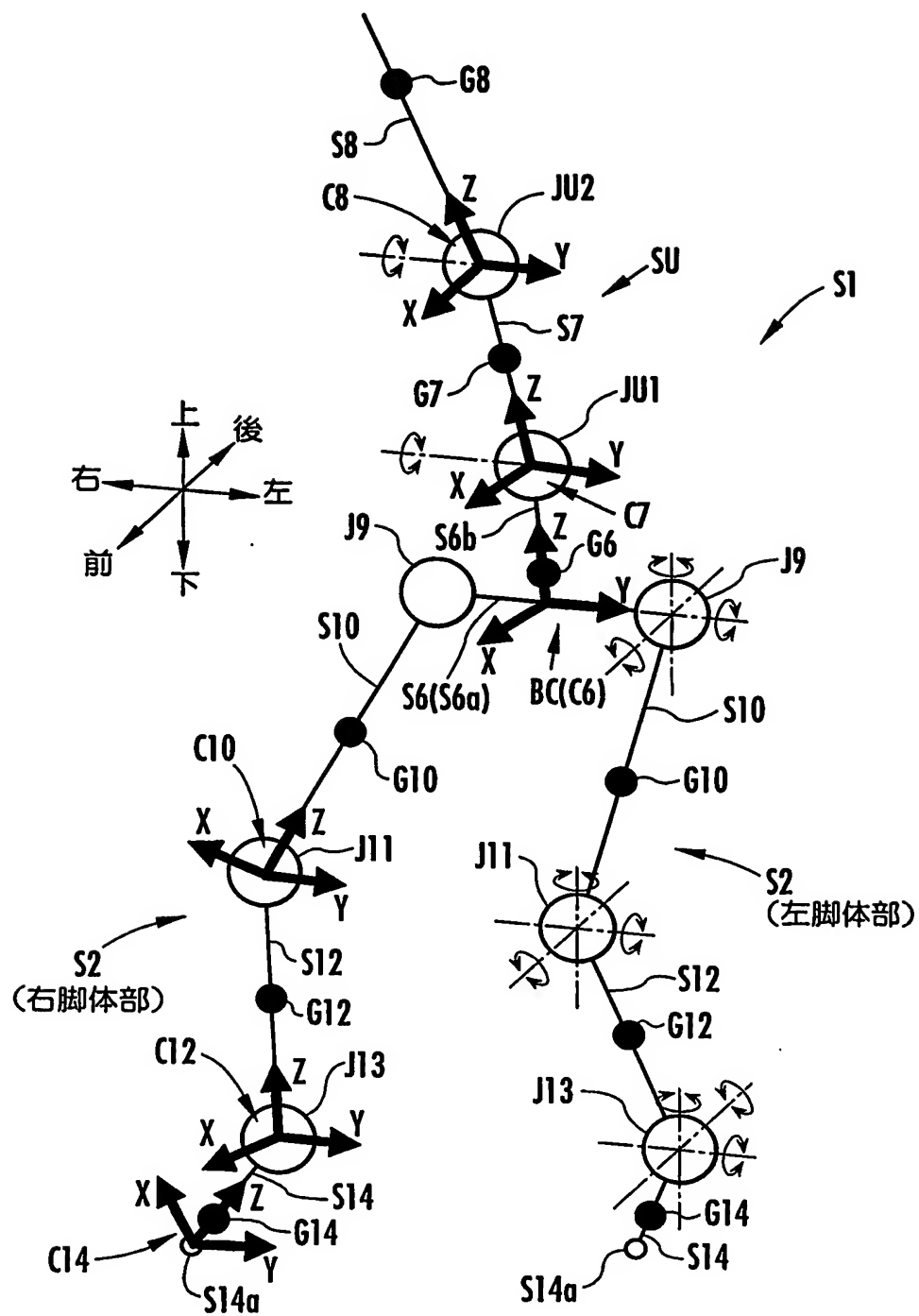


FIG.4

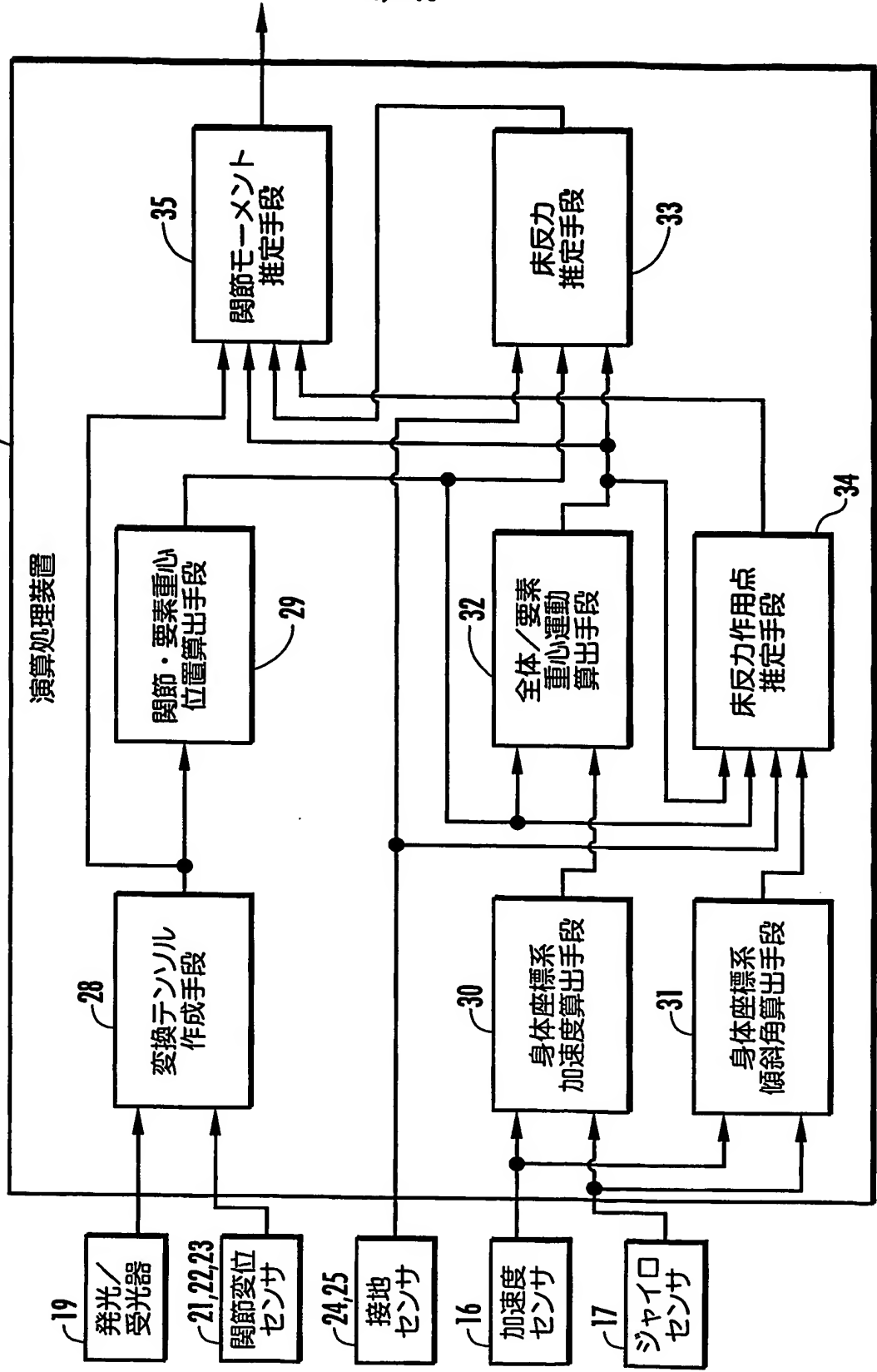
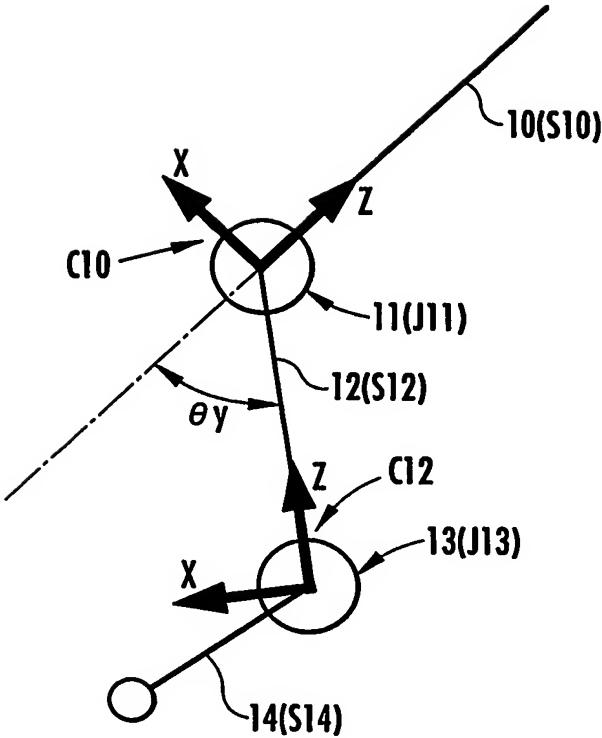


FIG.5



6/10

FIG.6

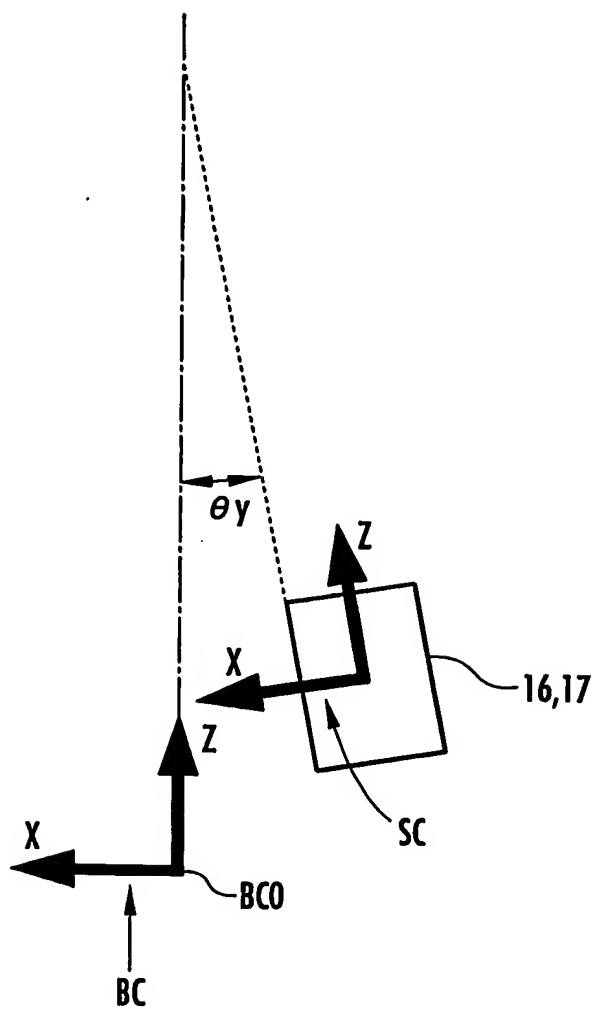
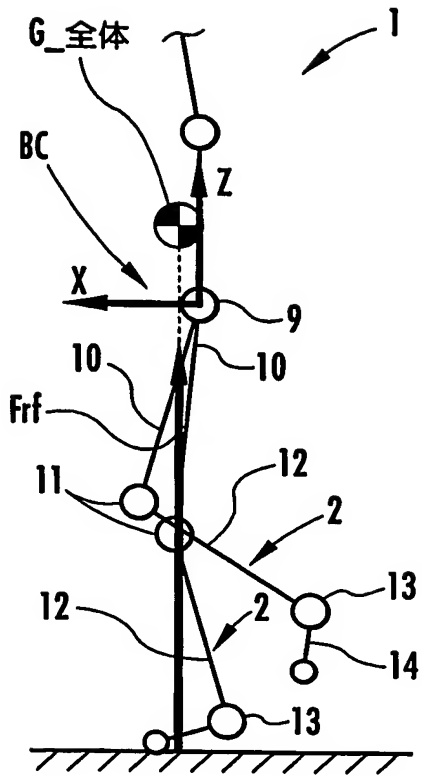


FIG.7



8/10
FIG.8(a)

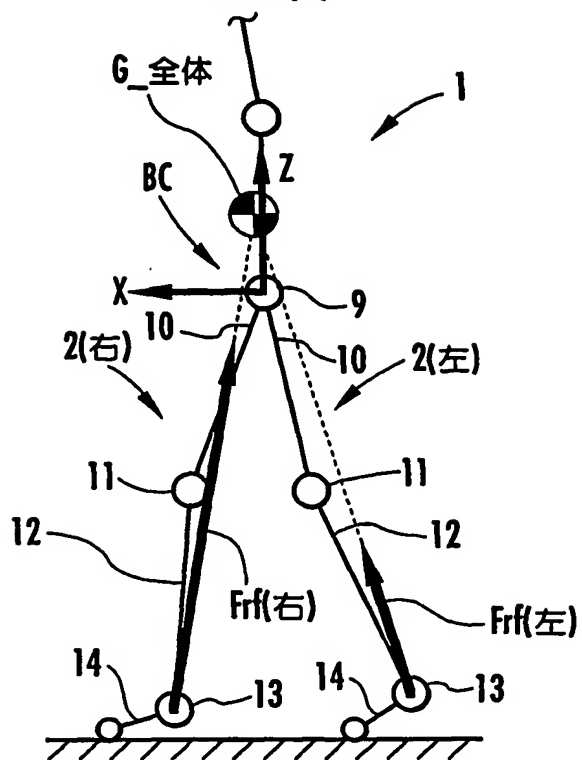


FIG.8(b)

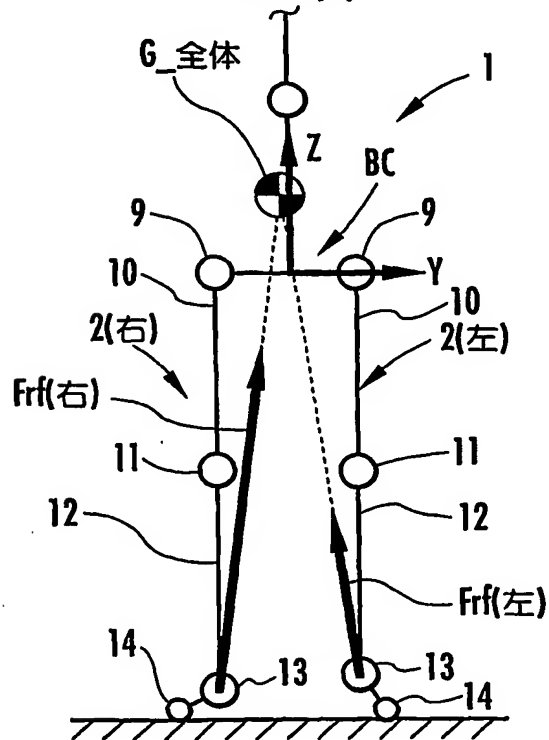


FIG. 9(a)

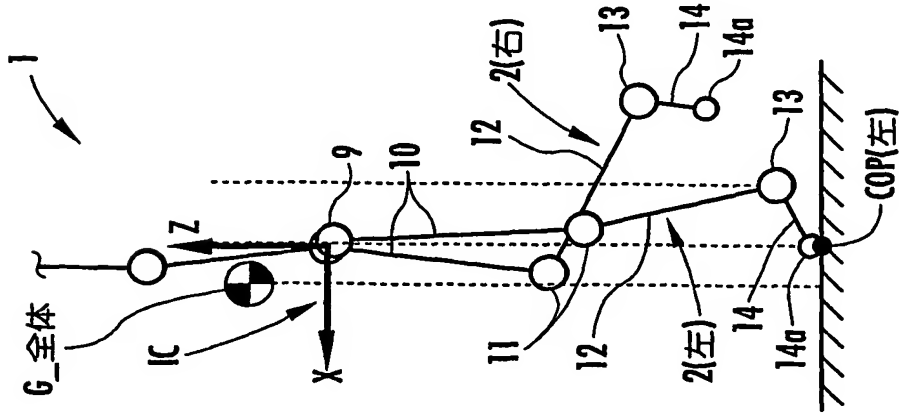


FIG. 9(b)

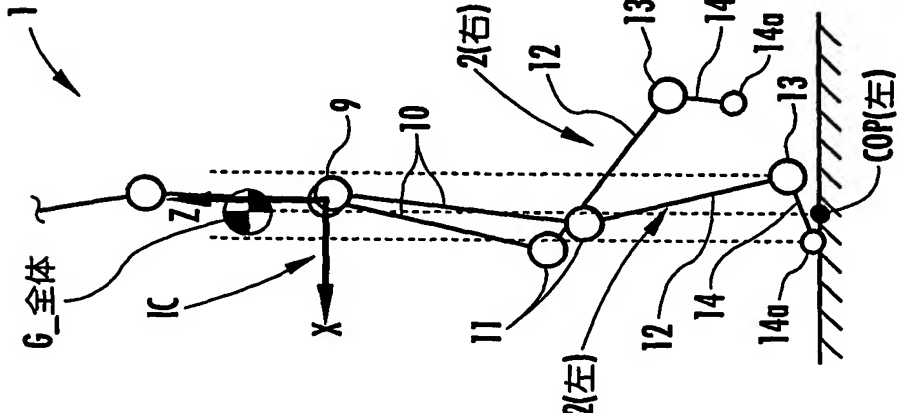


FIG. 9(c)

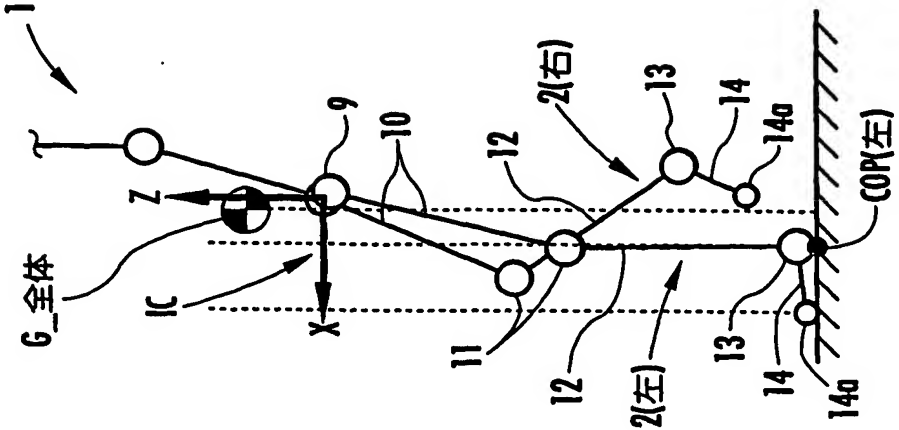
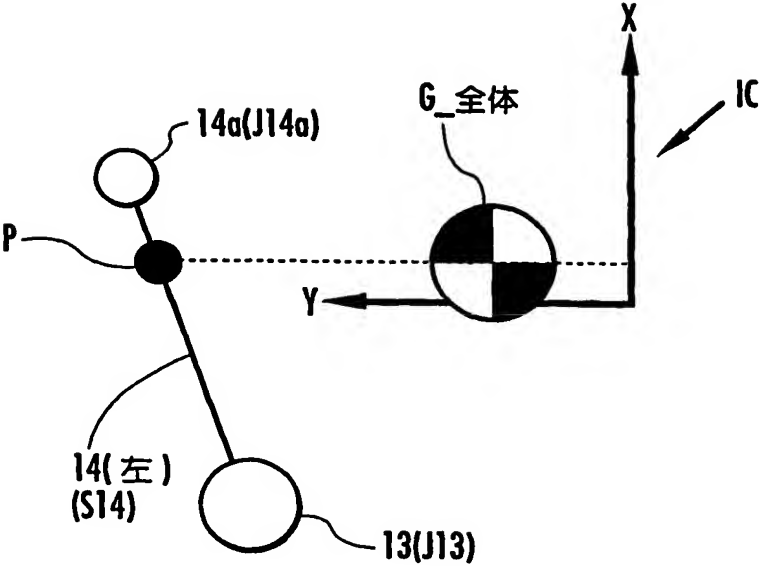


FIG.10



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/009518

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ B25J5/00, B25J13/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ B25J5/00, B25J13/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2003-117857 A (Honda Motor Co., Ltd.), 23 April, 2003 (23.04.03), Par. Nos. [0070] to [0143]; all drawings & WO 03/15997 A1 & EP 1424172 A1	1-5, 7, 9 6, 8
Y	JP 2003-117858 A (Sony Corp.), 23 April, 2003 (23.04.03), Par. Nos. [0077] to [0082]; Fig. 5 & US 2002-183897 A1 & EP 108943 A2 & KR 1050543 A & CN 1290590 A & TW 469211 B	1-5, 7, 9
Y	JP 2002-346957 A (Waseda University), 04 December, 2002 (04.12.02), Par. Nos. [0029] to [0074]; Fig. 2 (Family: none)	1-5, 7, 9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
08 October, 2004 (08.10.04)

Date of mailing of the international search report
26 October, 2004 (26.10.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int. C17 B25J5/00, B25J13/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int. C17 B25J5/00, B25J13/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
日本国公開実用新案公報 1971-2004年
日本国実用新案登録公報 1996-2004年
日本国登録実用新案公報 1994-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y A	JP 2003-117857 A(本田技研工業株式会社)2003. 04. 23, 【0070】 - 【0143】, 全図 & WO 03/15997 A1 & EP 1424172 A1	1-5, 7, 9 6, 8
Y	JP 2003-117858 A(ソニー株式会社)2003. 04. 23, 【0077】 - 【0082】, 図5 & US 2002-183897 A1 & EP 1084943 A2 & KR 1050543 A & CN 1290590 A & TW 469211 B	1-5, 7, 9
Y	JP 2002-346957 A(学校法人早稲田大学)2002. 12. 04, 【0029】 - 【0074】, 図2 (ファミリーなし)	1-5, 7, 9

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

08. 10. 2004

国際調査報告の発送日

26.10.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

所村 美和

3C

9617

電話番号 03-3581-1101 内線 3324